Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Desenvolvimento de "*Software*" *Educativo para o Dimensionamento de Subestações*

Elisabete Sofia Martins Jesus

VERSÃO PROVISÓRIA

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Professor Doutor Hélder Filipe Duarte Leite

Junho de 2014

Resumo

O dimensionamento de barramentos e suportes em subestações é um procedimento que assume contornos de alguma complexidade. Pois é um processo que implica a execução de numerosos cálculos, e a consulta de várias tabelas e ábacos, no sentido de verificar a adequação do barramento e do suporte para a subestação em causa.

Surge então a necessidade de desenvolver um programa que agregue toda a informação necessária para o dimensionamento de barramentos e suportes, e ainda execute toda a parte de cálculos de dimensionamento contra os efeitos térmicos e mecânicos resultantes das correntes de curto-circuito.

Ainda, verificando as vantagens pedagógicas de um *software* educativo em ambientes tanto académicos como profissionais, desenvolveu-se um programa de simulação. Este programa permitirá aos utilizadores, principalmente profissionais na área de subestações, construírem e aperfeiçoarem os conhecimentos, relativos ao dimensionamento de condutores e suportes em subestações, contra os efeitos dinâmicos das correntes de curto-circuito.

A aplicação foi desenvolvida em linguagem de programação Java, recorrendo ao IDE NetBeans, e para a construção da base de dados foi utilizada o SQLite.

O *software* foi construído de forma permitir a sua fácil utilização permeando a versatilidade de situações que poderão ser analisadas, revelando ser também uma ferramenta eficaz nos exemplos de cálculo efetuados.

Abstract

The design of busbars and supports in electrical substations is a procedure that takes contours of some complexity, it is a process that involves performing numerous calculations, and query multiple tables and charts in order to verify the adequacy of the bus and support to that substation.

Then come the need to develop an application which aggregates all the information necessary for the design of busbars and supports and that can still perform all of the calculations sizing against thermal and mechanical effects resulting from short circuit currents.

Yet a simulation program by checking the pedagogical benefits of educational software in both academic and professional environments, was developed. This program allows users, especially professionals in substations, to construct and improve their knowledge, concerning the sizing of conductors and supports of substations against the dynamic effects of short-circuit currents. These application was developed in Java programming language, using NetBeans IDE, and SQLite was used for the database.

The software has been built in order to allow easy operation permeating the versatility of situations which can be analyzed, revealing to be an effective tool of for the examples that were made.

Agradecimentos

O meu primeiro agradecimento dirige-se ao meu namorado, pelo seu apoio incondicional em todas as fases deste trabalho.

Agradeço igualmente ao Professor Doutor Hélder Leite, meu orientador, pelo grande voto de confiança depositado em mim, pela sua orientação e incentivo na realização deste trabalho.

Por último e não menos importante, agradeço ao meu orientador da EDP Distribuição, Engenheiro Bruno Sérgio Silva, e a todos aqueles que no departamento de projeto e construção da EDP me acompanharam e apoiaram- me.

Índice

Lista de figuras

Lista de tabelas

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

AC	Corrente alternada
AT	Alta Tensão
BD	Base de Dados
CEI	Comissão Eletrotécnica Internacional
CIGRÉ	International Council on Large Electric Systems
DC	Corrente Contínua
MT	Média Tensão
TI	Transformador de Intensidade

Lista de símbolos

A	Secção do condutor principal
A_s	Secção do subcondutor
a	Distância ao centro entre condutores
a_m	Distância equivalente entre condutores principais adjacentes
a_{min}	Distância mínima entre condutores
a_s	Distância equivalente entre subcondutores
a_{1n}	Distância entre o centro do subcondutor 1 e o subcondutor n
a_{1s}	Distância entre subcondutores
a_{sw}	Distância efetiva entre subcondutores no feixe
b_s	Dimensão de um subcondutor perpendicular à direção da força
fes	Flecha estática equivalente de um condutor a meio do vão
b_h	Deslocamento horizontal máximo
C_D	Fator de dilatação
C_F	Fator de forma
c_s	Dimensão de um subcondutor na direção da força
c_{th}	Constante do material
d	Diâmetro exterior do condutor tubular ou flexível
E	Módulo de Young
E_{eff}	Módulo de Young efetivo
F'	Característica da força eletromagnética por unidade de comprimento em condutores flexíveis
F_{m3}	Força exercida no condutor principal central durante a passagem da corrente de curto-circuito trifásica
$F_{r,d}$	Força sobre o suporte de condutores rígidos

$F_{f,d}$	Força de queda de um condutor principal
$F_{pi,d}$	Força de tensão do condutor principal (efeito de aperto)
F_s	Força entre subcondutores durante um curto-circuito
F_{st}	Força de tensão estática num condutor principal flexível
$F_{t,d}$	Força de tensão durante o curto-circuito no condutor principal
F_v	Força entre subcondutores resultante da corrente de curto-circuito
f	Frequência de rede
f_{cm}	Frequência própria do condutor principal
fes	Flecha estática equivalente de um condutor a meio do vão
f_{cs}	Frequência própria dos subcondutores
f_{ed}	Flecha dinamica de um condutor a meio do vão
f_y	Tensão correspondente ao limite elástico
g	Valor convencional da aceleração da gravidade
h	Altura do *dropper*
I_{CC}	Corrente de curto-circuito inicial simétrica (r.m.s)
I_{th}	Corrente de curto-circuito térmica equivalente
I_k	Corrente de curto-circuito em regime estacionária
I'_k	Corrente de curto-circuito em regime transitório
i_p	Valor de pico da corrente de curto-circuito
J_m	Momento de inércia do condutor principal
J_s	Momento de inércia do subcondutor
j	Parâmetro que determina a configuração de um feixe durante a passagem da corrente de curto-circuito
k_{1s}	Fator relativo à distância equivalente de um condutor
l	Distância ao centro entre suportes
l_c	Comprimento de um condutor principal flexível num vão
m	Fator de aquecimento da componente d.c. da corrente de curto-circuito
m'_s	Massa por unidade de comprimento do subcondutor
m'_m	Massa por unidade de comprimento do condutor principal
N	Norma de rigidez de uma instalação com condutores flexíveis
n	Número de subcondutores de um condutor principal
n	Fator de aquecimento da componente a.c. da corrente de curto-circuito
q	Fator de plasticidade
r	Relação entre a força eletromecânica sobre um condutor devido a um curto-circuito e a sua gravidade
R	Resistência do condutor
S	Constante de elasticidade dos suportes de um vão
S_{th}	Densidade da corrente de curto-circuito térmica equivalente
S_{thr}	Densidade de corrente nominal de curta duração
s	Diâmetro interior do tubo
T	Período de oscilação de um condutor
T'_d	Constante de tempo transitória de uma máquina síncrona no eixo direto
T_k	Duração da corrente de curto-circuito
T_{kr}	Tempo normalizado para o cálculo da densidade de corrente nominal de curta duração
T_{res}	Período resultante da oscilação de um condutor durante a passagem de um curto-circuito
V_F	Relação entre as forças dinâmicas e estáticas exercidas sobre os

suportes

V_{rm} Relação entre as tensões de um condutor principal com e sem reengate automático trifásico

V_{rs} Relação entre as tensões de um subcondutor com e sem reengate automático trifásico

$V_{\sigma m}$ Relação entre as tensões dinâmica e estática de um condutor principal

$V_{\sigma s}$ Relação entre as tensões dinâmica e estática de um subcondutor

W_m Módulo de flexão de um condutor principal

W_s Módulo de flexão de um subcondutor

X Reatância do condutor

α Fator relativo à força sobre um suporte

α_{20} Coeficiente de temperatura

β Fator relativo à tensão de um condutor principal

c Capacidade térmica especifica

ρ Massa específica

γ Fator relativo à estimação da frequência própria

δ_1 Direção angular da força

δ_{end} Ângulo de oscilação no final da passagem da corrente de curto-circuito

δ_{max} Ângulo máximo de oscilação

ε_{ela} Alongamento elástico

ε_{pi} Fator de tensão da contração de um feixe

ε_{st} Fator de tensão da contração de um feixe

ε_{th} Dilatação térmica

ζ Fator de tensão de um condutor principal flexível

η Fator para o cálculo de $F_{pi,d}$ no caso de subcondutores que não colidem

θ_b Temperatura do condutor no início do curto-circuito

θ_e Temperatura do condutor no fim do curto-circuito

k Fator para o cálculo do valor de pico da corrente de curto-circuito

μ_0 Constante magnética, permeabilidade do vácuo

v_e Fatores para o cálculo de $F_{pi,d}$

v_1 Fatores para o cálculo de $F_{pi,d}$

v_2 Fatores para o cálculo de $F_{pi,d}$

v_3 Fatores para o cálculo de $F_{pi,d}$

v_4 Fatores para o cálculo de $F_{pi,d}$

ξ Fator para o cálculo de $F_{pi,d}$ no caso de choque de subcondutores

σ_{fin} Valor mais pequeno de σ, quando o módulo de Young se torna constante

$\sigma_{m,d}$ Tensão de flexão causada pelas forças entre condutores principais

σ_{tot} Tensão resultante de um condutor

χ Quantidade para o máximo ângulo de oscilação

φ Fatores para a força de tensão num condutor flexível

ψ Fatores para a força de tensão num condutor flexível

k_{20} Condutividade especifica a 20ºC

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos quarenta anos presenciou-se à difusão do computador, expandindo-se nas mais diversas áreas, tendo assumido um papel importante no âmbito da construção do conhecimento.

O computador aliado ao *software* educativo, proporciona a criação de ambientes de aprendizagem que enfatizam a construção do saber. Estes programas, quando corretamente utilizados favorecem a aprendizagem de um conceito. Por conseguinte, constitui uma solução incontestável na área da formação profissional, na medida em que pode estimular o desenvolvimento do raciocínio lógico e, consequentemente da autonomia tal como, a extrapolação de conclusões a partir dos resultados apresentados.

Atualmente existem programas educativos em diversas áreas do conhecimento, contudo os programas de dimensionamento automático na área de simulação de curto-circuitos, não contemplam diversas configurações de subestações, e alguns deles estão neste momento desatualizados. Por conseguinte, houve a necessidade da EDP Distribuição em possuir um programa de simulação de curto-circuitos. Com os resultados do programa de simulação de curto-circuitos, o utilizador poderá efetuar o planeamento e desenhar a subestação, uma vez que com o programa o utilizador poderá antever as consequências prejudiciais dos defeitos simulados. Este conhecimento facilita a tomada de medidas necessárias para minimizar estas consequências.

Deste modo, os objetivos deste trabalho centram-se em desenvolver um *software* educativo, que permita simular os efeitos mecânicos e térmicos em condutores (tanto flexíveis como rígidos) e suportes de subestações, verificando se estes equipamentos resistem aos efeitos dinâmicos das correntes de curto-circuito. Este programa deverá ser capaz de albergar informação vasta e atualizável, relativa aos barramentos e suportes disponíveis no mercado, e capaz de a utilizar, em conjunto com os dados fornecidos pelo utilizador, para simular os efeitos dos curto-circuitos. Assim será possível efetuar o correto dimensionamento de barramentos e suportes para subestações. O *software* desenvolvido deverá ser flexível na medida em que permitirá experimentar diferentes soluções para os vários troços existentes em subestações.

1.1- Estrutura da Dissertação

Este documento encontra-se dividido em 6 capítulos. O presente capítulo destina-se a fazer uma breve introdução explicando a motivação para a realização deste trabalho, tal como os seus objetivos. É ainda efetuada uma descrição da estruturação da dissertação onde é apresentado um resumo de cada capítulo.

No segundo capítulo será feita uma pequena abordagem sobre as subestações de distribuição e transporte, tal como a força principal que atua sobre os equipamentos aquando de um curto-circuito nas subestações. Também será feita uma revisão sobre o impacto desta força – força eletromagnética- em condutores paralelos. Será feita também referência aos efeitos dinâmicos (efeitos térmicos e mecânicos) das correntes de curto-circuito em condutores e suportes das subestações. Por fim, será feita uma abordagem sobre as principais normas que orientam o cálculo dos efeitos térmicos e mecânicos dos curto-circuitos em subestações, nomeadamente da CEI e a CIGRÉ.

No terceiro capítulo será feita uma abordagem sobre *software* educativo, a sua importância e a forma como pode contribuir para a construção de conhecimento. Será também feita referencia aos dois principais paradigmas assentes sobre o *software* educativo, nomeadamente o paradigma construtucionista e o instrutucionista. Também, será feita uma revisão sobre os tipos de *software* educativos, importantes para a escolha do tipo de software educativo a desenvolver, e as características e etapas que premeiam o desenvolvimento de um *software*. No capítulo três será também feita uma abordagem sobre as características ergonómicas de uma *interface*, que servirão de guia para o desenvolvimento da mesma.

No capítulo 4 é descrito o paradigma educativo que apoiou o desenvolvimento do programa. Será também apresentado as características e as funcionalidades do programa desenvolvido, tal como os fluxogramas que orientaram o desenvolvimento de toda a programação efetuada.

No capítulo 5 é apresentado um caso de estudo para cada tipo de condutor (barra, tubo e cabo), onde é feito o cálculo sem recorrer ao *software* desenvolvido, tal como será feito o cálculo automático, recorrendo para isso ao *software* desenvolvido. Posteriormente serão comparados os resultados obtidos pelo cálculo manual e automático de forma a validar o programa.

Por último, o sexto capítulo destina-se a apresentar as principais conclusões e limitações do programa desenvolvido.

Capítulo 2

Efeito dos Curto-Circuitos em Subestações – Uma visão geral

Neste capítulo será feita uma breve referência à constituição e finalidade das subestações de distribuição e transporte. Será mencionada na secção 2.2 a principal força a que estão sujeitos os diversos equipamentos das subestações quando expostos a uma corrente de curto-circuito. A complementar, na secção 2.3 será descrita os efeitos que as correntes de curto-circuito têm nas subestações. Também na secção 2.4 serão abordados alguns desenvolvimentos realizados na área de cálculo de curto-circuitos em subestações.

2.1- Subestações de Distribuição e Transporte

Uma subestação é uma instalação elétrica de alta potência, que contém um conjunto de aparelhos elétricos como seccionadores, disjuntores, transformadores, barramentos e uma sala de controlo. Estes aparelhos estão interligados e organizados de forma a fazerem parte do sistema de distribuição de energia elétrica de um país. [1]

As subestações, normalmente têm várias finalidades, tais como: o controlo do fluxo de energia, que interliga os vários produtores e não permite que haja falhas nos consumidores; para além de elevar a tensão na distribuição ou reduzi-la para consumo. A estrutura da subestação deve ser, portanto, projetada para suportar as forças dinâmicas decorrentes de um curto-circuito. A subestação deve estar projetada de forma a evitar o fracasso de qualquer componente da subestação, sem excesso de conceção e aumento desnecessário do custo global da estrutura. [1]

Um curto-circuito pode ser definido como uma conexão intencional ou acidental, em geral de baixa impedância, entre dois ou mais pontos, que normalmente estão a diferentes potenciais elétricos. Consequentemente resulta uma corrente elétrica que pode atingir valores muito elevados, tal como valores de forças eletromagnéticas elevadas, e que traz consequências nefastas para as estruturas das subestações. [2]

2.2- Força Eletromagnética – A força primal para o cálculo dos efeitos dinâmicos provocados pelas correntes de curto-circuito

Numa subestação verifica-se várias vezes, a existência de dois ou mais condutores em paralelo. Estes condutores sofrem efeitos de atração e de repulsão mutuamente, como consequência das forças do campo magnético produzido pela corrente que circula pelos mesmos. Essas forças serão de atração, se as correntes circulem no mesmo sentido, ou de repulsão, quando estas estão em sentidos opostos. [2]

Sob condições normais de funcionamento, as forças eletromagnéticas são muito pequenas e não causam um impacto significativo na estrutura mecânica da subestação, e portanto são negligenciadas. No entanto, em condições de curto-circuito, a força eletromagnética é relativamente grande e pode danificar a estrutura mecânica do sistema, se este não for projetado corretamente. [3]Na figura 2.1 estão ilustradas as forças de atração e repulsão aplicadas aos condutores paralelos.

Figura 2.1 -Efeito de atração e repulsão sob condutores paralelos **[2]**

Resultados de vários estudos na área dos curto-circuitos em barramentos de subestações concluíram que, a força eletromagnética exercida sobre as estruturas constituintes da subestação, para além de estar relacionada com o valor das correntes de curto-circuito, está também ligada à dimensão, configuração dos condutores, e o espaçamento entre eles. [4]

Esta força é considerada essencial para o cálculo das forças que são exercidas sobre as estruturas das subestações.

2.2.1- Força eletromagnética em condutores paralelos – revisão

O cálculo da força eletromagnética entre condutores permite projetar de forma eficaz, o espaçamento entre eles, a dimensão e estrutura de apoio para minimizar as forças expostas sobre os barramentos. [5]Uma análise cuidadosa desta força e os seus efeitos é necessária para evitar tensões excessivas nos condutores e quebra dos isoladores de suporte. Em seguida, deve ser concebido um condutor que permita resistir a estas forças, sem danos. A determinação da área da secção transversal do material condutor e estrutura de suporte

depende da magnitude da corrente de curto-circuito e o tempo de duração dessa corrente. [6]

Até ao momento, têm sido realizados estudos por vários investigadores acerca da estimativa da força eletromagnética num barramento, onde esta é calculada seguindo as diretrizes da norma CEI 60865/1994. Esta força sendo posteriormente simulada numa ferramenta computacional, revelou que num sistema de condutores trifásico, o condutor central (fase B) apresenta um valor mais elevado de força eletromagnética em comparação com condutor externo (fase A e C), como se pode verificar pela figura que se segue. [3] Por esta razão a CEI calcula algumas forças aplicadas na fase central do barramento. [7]
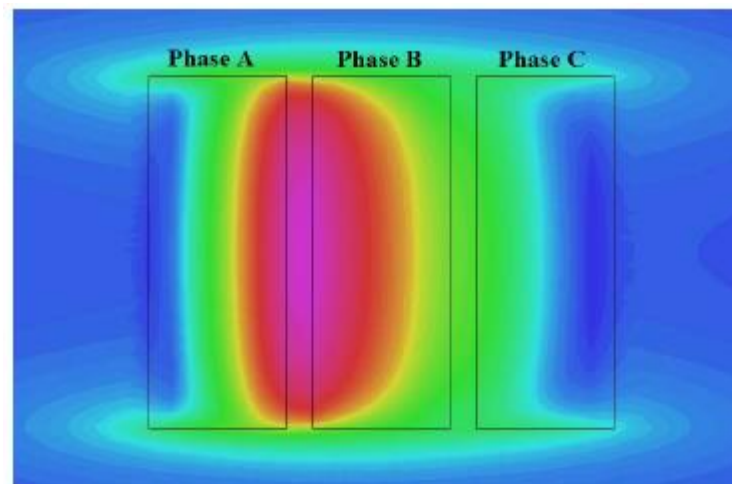
Figura 2.2-Densidade do fluxo magnético aquando de um curto-circuito trifásico [21]

Concluiu-se também que, o valor da força eletromagnética está dependente da configuração do barramento, razão pela qual a CEI 60865/1994 introduziu a variável relativa à distância efetiva entre condutores para o cálculo desta força, e avaliar os efeitos dinâmicos das correntes de curto-circuito. [8]

2.3- Efeitos dinâmicos causados pelas correntes de curto-circuito em subestações de distribuição e transportes

No momento em que ocorre o curto-circuito, a corrente aumenta rapidamente atingindo seu valor máximo. Em seguida inicia-se o processo de diminuição exponencial da magnitude, atingindo valores de transitório e subtransitório, para alcançar finalmente, após alguns ciclos, o valor de curto-circuito permanente, como se pode ver pela figura 2.3. [9]
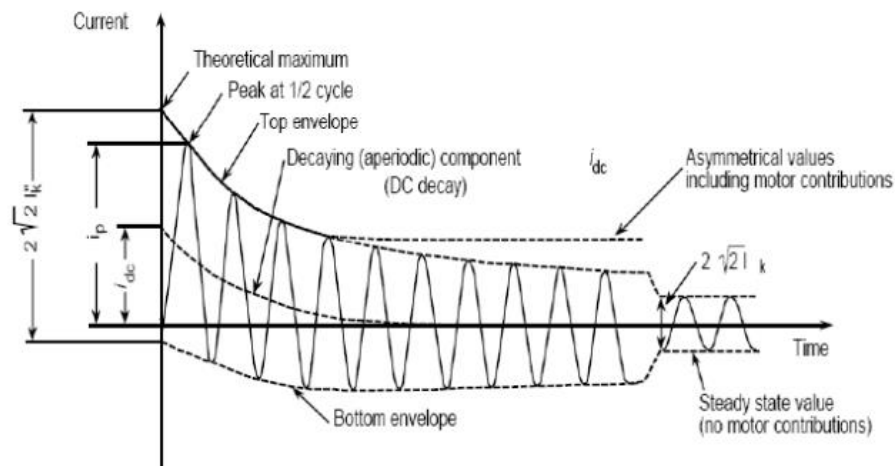
Figura 2.3 -Forma de onda da corrente AC de curto-circuito e decaimento da componente DC [9]

No instante em que a corrente atinge seu valor de curto-circuito permanente iniciam-se as ações do efeito térmico nos condutores e partes condutoras da aparelhagem da subestação, fazendo com que suas temperaturas aumentem. A elevação de temperatura pode conduzir à deformação das estruturas. [9]

No caso particular dos barramentos, elevadas temperaturas fazem com que a resistividade do condutor aumente, e dependendo do grau dessa elevação, as características mecânicas como ductilidade e resistência à corrosão do material podem também sofrer alteração. Em último caso levar à quebra de suportes. No caso dos curto-circuitos através de arcos elétricos podem ocorrer ainda explosões e incêndios, se não houver uma pronta atuação da proteção. [10]

O cálculo de todas as forças atuantes nas estruturas assume um papel fundamental, pois os barramentos e suportes sofrerem esforços térmicos e mecânicos, quando expostos a correntes de curto-circuito. [10]

2.4- Orientação para o cálculo dos efeitos dinâmicos dos curto-circuitos

Para o desenvolvimento do cálculo de curto-circuitos, existem normas específicas, onde usualmente são utilizadas normas europeias da Comissão Eletrotécnica Internacional. Os estudos realizados pela CEI constituem uma referência para o cálculo dos curto-circuitos em subestações, tendo em consideração os efeitos mecânicos e térmicos que estes causam nos equipamentos da mesma. [7]

A International Council on Large Electric Systems realizou também investigações que incluem a simulação de condutores rígidos e flexíveis, quando expostos a elevadas correntes de curto-circuito, onde é analisado o efeito dessas correntes nos diversos equipamentos de uma subestação, tal como todas as forças que os condutores estão sujeitos perante correntes de curto-circuito. [4]

As simulações efetuadas pelo CIGRÉ têm por base as normas da CEI, e fazem uma análise completa para o estudo dos efeitos dos curto-circuitos em subestações, uma vez que contempla várias configurações barramentos, para vários tipos de condutores. [4]

2.4.1- Desenvolvimento da CEI 60865 para o cálculo dos curto-circuitos em subestações

Em 1955 foi desenvolvido por Lehmann, o primeiro método de análise de curto-circuitos, usando condutores rígidos. Posteriormente, novas investigações resultaram em edições publicadas em 1986, pela CEI, e em 1994, o método da CEI/EN 60865-1 foi aprovado, que contemplam não só condutores rígidos mas também flexíveis. [4]

A norma CEI 60865 divide a análise dos efeitos dos curto-circuitos em duas partes, de acordo com o tipo de condutores (condutores rígidos e condutores flexíveis), uma vez que as forças que atuam sobre estes são diferentes. [7]

Através do método descrito pela CEI é possível averiguar se os diversos equipamentos de uma subestação resistem aos esforços causados pelas correntes de curto-circuito.

A. Condutores Rígidos

Segundo a CEI 60865/1994 a análise dos efeitos mecânicos nos condutores rígidos comtempla os seguintes aspetos [8]:

- Cálculo de curto-circuitos trifásicos ou entre duas fases;
- Tipo de condutor rígido: é possível efetuar o cálculo personalizando o tipo de condutor em análise, isto é, se é um barra ou um tubo. Ainda, se pode aprofundar o cálculo para as diversas formas que a barra e o tubo podem assumir;
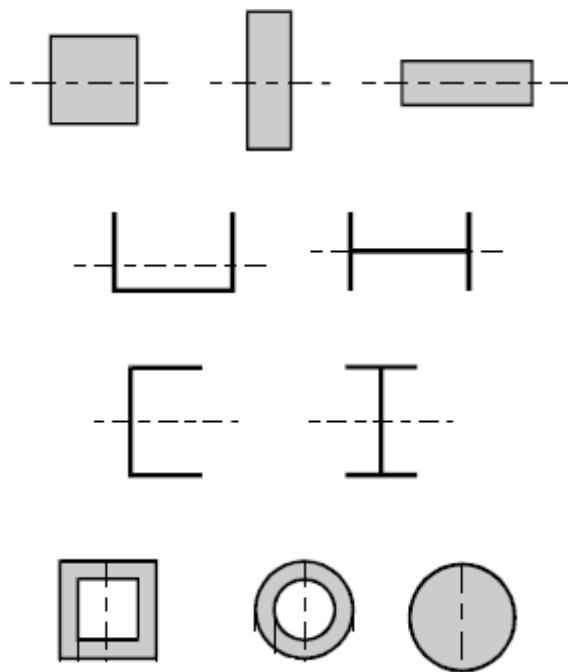
Figura 2.4 -Formas dos condutores rígidos [9]

- A resistência do condutor aos esforços provocados pelos curto-circuitos varia consoante o tipo de material: cobre, alumínio, ou aço reforçado;
- Diferentes tipos de suportes e número de vãos;
- Religação automática nas três fases;

- Condutores simples (um condutor por fase) ou múltiplos condutores por fase (subcondutores);
- Existência ou não de peças conectoras entre subcondutores;
- Simulação da direção de oscilação do condutor perpendicularmente ao condutor ou ao longo do condutor;
- Cálculo da frequência de oscilação do condutor e subcondutor.

A última publicação da CEI (CEI 60865/2011) relativamente ao cálculo dos efeitos dos curto-circuitos contempla o efeito das religações automáticas, nomeadamente a influência tanto da primeira como segunda corrente de curto-circuito. [7]

Através de todos os pontos referidos na subsecção 2.4.1, relativo aos condutores rígidos, é possível analisar de forma pormenorizada o efeito da corrente de curto-circuito tendo em conta as particularidades do barramento.

Assim, é possível calcular as frequências próprias, forças aplicadas ao barramento e suportes, permitindo estudar o comportamento do sistema, ou mesmo detetar e melhorar pontos fracos, determinando também o grau de resistência dos condutores às correntes de curto-circuito. [4]

B. Condutores Flexíveis

No que concerne aos cabos flexíveis, foram realizados vários testes para analisar o comportamento destes condutores perante curto-circuitos em subestações, e verificar a sua viabilidade em projetos de subestações. [4]

Através de métodos desenvolvidos é possível efetuar o cálculo manual, ou em computadores pessoais (usando poderosos algoritmos de cálculo), resolvendo equações analíticas e consultando figuras. Para a resolução destes cálculos, são necessários dados de entrada, e os resultados são valores máximos de forças e de deslocamentos. [4]

Na norma europeia CEI 60865 de 2011, é usado um método para o cálculo dos valores máximos de:

- Força de tração durante e no fim do curto-circuito;
- Força de aperto nos subcondutores;
- Deslocamento horizontal durante a oscilação do condutor;

Estas forças podem ser calculadas, tendo em conta as características do curto-circuito e a configuração dos condutores presentes na subestação.

Em 2011, desenvolvimentos na área de estudo dos curto-circuitos permitiram analisar os efeitos de derivações em condutores principais, denominados na língua inglesa como *dropper*. [7] Verificou-se que estes condutores estão sujeitos em condições normais, a uma tensão geralmente muito baixa - menos de 1 $\mathrm{N/mm^2}$. Contudo, na presença forças electromagnéticas de curto-circuito o comportamento do *dropper* é diferente do condutor principal e atualmente as forças a que este está sujeito já podem ser calculadas. [4]

A figura 2.5 mostra sete diferentes configurações para condutores flexíveis que são usadas em subestações, entre elas salienta-se o *dropper* representado pelas letras B, E e F. [4]
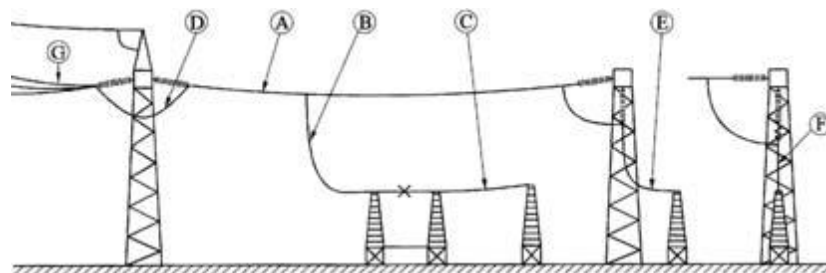
Figura 2.5 -Configuração de condutores flexíveis **[4]**

Para condutores flexíveis, os cálculos de acordo com a publicação CEI 60865-1 foram sujeitos a testes intensivos em diferentes laboratórios. As maiorias dos resultados dos testes encontram-se na gama de ± 25% de concordância entre eles. Confrontando os diferentes testes, concluiu-se que o método implementado pela CEI é válido e indicado para projetar subestações. [4]

Para além dos efeitos mecânicos, os curto-circuitos também têm efeitos térmicos sobre os condutores. Assim, a norma CEI 60865 conjuntamente com norma CEI 60690 permite a análise dos efeitos térmicos das correntes de curto-circuito. Esta análise é feita em função do tempo de duração da corrente de curto-circuito, onde através do cálculo da densidade da corrente de curto-circuito é possível aferir se o condutor resistirá aos efeitos térmicos dos curto-circuitos. [9]

Tendo por base as orientações da CEI referidos na secção 2.4 deste capítulo, será possível desenvolver ferramentas computacionais que permitem efetuar todo um cálculo complexo. Estes cálculos permitirão projetar de forma eficaz todos os barramentos e suportes de uma subestação, de forma a suportar uma determinada corrente de curto-circuito, possibilitando também ser estudado novas configurações de subestações.

2.5- Considerações Finais

Os efeitos dos curto-circuitos em subestações podem provocar deformações permanentes nos equipamentos. Por isso torna-se importante proceder ao cálculo dos efeitos térmicos e mecânicos das correntes de curto-circuito. Os efeitos das correntes de curto-circuito estão dependentes tanto do valor da corrente, tal como da configuração da subestação e dos condutores.

Para o cálculo dos efeitos dinâmicos devido à corrente de curto-circuito, a CEI constitui uma referência. A norma CEI 60865 conjuntamente com norma CEI 60690 permite analisar os efeitos térmicos e mecânicos das correntes de curto-circuitos. Em particular a norma CEI 60865 permite calcular diversas forças atuantes nos condutores e suportes aquando da passagem da corrente de curto-circuito, para condutores rígidos e flexíveis.

Capítulo 3

Software aplicado ao treino e educação: quais os desafios?

Na construção de conhecimento no universo da educação, as novas tecnologias têm evoluído rapidamente e já desempenharam um papel preponderante como elemento transformador no modo de aceder e organizar o universo da informação, colocando novos desafios pedagógicos na tarefa de auxiliar o formando a organizar novas áreas do saber. [11]

Este capítulo fará uma breve alusão ao *software* educativo, e aos paradigmas que estão na base da sua conceção, tal como alguns programas educativos existentes no mercado. Serão descritas as etapas para o desenvolvimento de um *software* educativo, e as características ergonómicas para a construção de uma *interface*.

3.1- O *software* Educativo: desafios

As tecnologias informáticas mostram que, quando utilizadas adequadamente, auxiliam no processo da construção do conhecimento, tornando o processo ensino-aprendizagem mais estimulante e mais eficaz. [12]

Com o desenvolvimento de tecnologias, mais precisamente do computador, surgiu o *software* educativo. [12] O *software* educativo tem como objetivo principal o de facilitar o processo de ensino-aprendizagem, em que dependendo do tipo de *software* pode levar o formando a construir um determinado conhecimento relativo a um conteúdo. Assim, à medida que o utilizador recebe as informações do computador, ele interpreta, renova e modifica o seu conhecimento, desenvolvendo o seu processo de construção e elaboração do saber. [13]

3.1.1 -Tipos de *software* educativo

Para desenvolver um *software* educativo, é necessário conhecer os diferentes tipos de *software* educativo. Uma das classificações mais usadas divide os tipos de *software* educativos em: tutoriais, exercícios e práticas, programação, multimédia e internet, simulação e jogos. [14]

A. Tutoriais

Caracterizam-se por transmitir informações pedagogicamente organizadas, como se fosse um livro animado ou um vídeo interativo. A informação é apresentada ao educando numa determinada sequência, e este pode escolher a informação que desejar. A informação que está disponível para o utilizador é definida e organizada previamente. O computador assume o papel de uma máquina de ensinar. O programa ensina o utilizador, dando-lhe informação, e a seguir efetua perguntas para verificar se compreendeu um determinado conteúdo. A resposta do utilizador é vista como um dos momentos do processo ensino-aprendizagem.

A limitação do tutorial está na capacidade de verificar se a informação foi processada e, portanto, se passou a ser conhecimento agregado aos esquemas mentais. Por exemplo, é difícil um tutorial ter condições para que o utilizador possa exercitar sua criatividade e explorar diferentes níveis de compreensão de um conceito.

B. Exercício e prática

Neste tipo de *software* são apresentados exercícios para os utilizadores resolverem. As perguntas e respostas são normalmente utilizadas para rever material já estudado, ou seja, o *software* procura reforçar fatos e conhecimentos, e enfatiza a memorização mecânica. Em geral, o resultado das respostas dos formandos é avaliado pelo computador.

C. Programação

A programação caracteriza-se por constituir um tipo de *software* em que o utilizador programa o computador, dando-lhe a possibilidade de criar os seus próprios modelos de programas, sem exigir grandes conhecimentos de programação. Ao programar o computador utilizando conceitos e estratégias, este pode ser visto como uma ferramenta para resolver problemas. A execução do programa exige que o utilizador processe a informação, transformando-a em conhecimento.

D. Multimédia e Internet

Este tipo de programas auxilia o utilizador a adquirir informações. Existem dois tipos de sistemas: os sistemas prontos, são semelhantes ao tutorial, nos quais a ação do utilizador resume-se em escolher opções oferecidas pelo *software*; e os sistemas de autoria que se assemelham aos processadores de textos. O uso de multimédia pronta e Internet são atividades que auxiliam o formando a adquirir informações, mas não a compreender ou construir conhecimentos com a informação obtida. Torna-se necessária a intervenção do "agente de aprendizagem" para que o conhecimento seja construído.

E. Jogos Educativos

Os jogos educativos são desenvolvidos geralmente com a finalidade de desafiar e motivar o utilizador, envolvendo-o numa competição com colegas, permitindo interessantes usos na educação. Contudo, os jogos podem dificultar o processo da aprendizagem uma vez que, quando o utilizador estiver a jogar, o interesse está direcionado para ganhar o jogo, e não em

refletir sobre os processos e estratégias envolvidos no mesmo. Sem essa consciência é difícil adquirir conhecimentos sobre a temática abordada pelo jogo.

F. Software de Simulação

Os programas educativos do tipo simulação possibilitam a vivência de situações difíceis ou até perigosas de serem reproduzidas. Para que um fenómeno possa ser simulado no computador, é necessário que um modelo desse fenómeno seja implementado. Assim, a escolha do fenómeno a ser desenvolvido é feito *à priori* e fornecido ao utilizador através do programa. Ao utilizador, cabe a alteração de certos parâmetros e a observação do comportamento do fenómeno, de acordo com os valores atribuídos. [12]

Este tipo de *software* permite o enriquecimento cognitivo da experiência através da assimilação de um conjunto de informações. Este enriquecimento pode-se dar pela introdução de uma *interface* que permita a captação e o tratamento simultâneo de uma grande quantidade de dados. O enriquecimento pode dar-se também pela repetição de um grande número de experiências, o que permitiria a criação de uma sensibilidade mais "aguçada" no que diz respeito ao relacionamento das variáveis envolvidas na experiência. Mas principalmente, por permitir o controlo a nível ideal, das variáveis de entrada do modelo, e assim a realização de uma experiência sob condições dificilmente obtidas na realidade. [12]

3.1.2 – *Software Educativo*: estado da arte

Os programas educativos englobam várias áreas do conhecimento, como: saúde, engenharia, matemática, química, entre outros.

De acordo com estudos feitos pelo "The Educational Products Information Exchange (EPIE) Institute" uma organização do "Teachers College", Columbia, E.U.A., foram identificados em 1983 mais de 7000 pacotes de *software* educacionais no mercado, sendo que 125 eram adicionados a cada mês. Estes incluíam principalmente as áreas da matemática, ciências, letras, artes e ciências sociais. Dos 7325 programas educacionais mencionados no relatório da Office of Technology Assestment (OTA) 66% são do tipo exercício-e-prática, 33% são tutoriais, 19% são jogos, 9% são simulações e 11% são do tipo ferramenta educacional. Hoje é praticamente impossível identificar o número de programas educacionais produzidos e comercializados, dado ao seu elevado número. [15]

Dos programas educativos existentes na área da engenharia eletrotécnica salienta-se o: "3D virtual classroom environment for teaching renewable energy production and substation equipment". Este *software* educativo é do tipo jogo, recorrendo a um jogo online já existente -"Second Life". Este programa permite aos utilizadores aprenderem como uma turbina eólica produz energia, observando os diversos componentes a intervirem em todo o processo. [16]

Também, o "Teaching reliability analysis of HV/MV substations and distribution feeders using educational *software*", um software educativo do tipo simulação, ajuda os seus utilizadores a aprenderem a melhorar a fiabilidade das subestações AT/MT. Neste programa os utilizadores criam uma subestação e atribuem índices de reparação e avaria, analisando posteriormente a sua fiabilidade e os pontos críticos da subestação, investigando quais as formas de melhorar. [17]

Outro *software* educativo desenvolvido na área da engenharia eletrotécnica é o: "A distribution automation system simulador for training and research", onde o simulador

fornece um ambiente interativo para compreender a tecnologia emergente de automação de distribuição de energia. [18]

No que concerne à área dos curto-circuitos em subestações, torna-se necessário desenvolver um *software* educativo que possibilite simular os efeitos de curto-circuitos em diversos pontos da subestação. Pois alguns dos programas existentes no mercado, apenas fazem a simulação da força eletromagnética ou o cálculo de barramentos rígidos em forma de barra.

3.2- Paradigmas pedagógicos inerentes ao *software* educativo

O *software* educativo constitui um programa que pode consoante a referência pedagógica, permite estimular o desenvolvimento do raciocínio lógico e, consequentemente, da autonomia do individuo. Estes programas seguem a “linha” do construcionismo: o computador como ferramenta de aprendizagem. [12]

Segundo o construcionismo – desenvolvido por Papert- o computador é uma ferramenta com a qual o formando desenvolve algo, e, portanto, a aprendizagem ocorre pelo fato de se estar a executar uma tarefa através do computador. Fica explícita a ideia de que, o utilizador será o sujeito promotor de uma ação, ou seja: o seu lugar deixa de ser o de espectador e passa a ser o de agente da aprendizagem. O utilizador sai da passividade de quem só recebe, para se tornar ativo na procura da informação, de problemas para resolver e de assuntos para pesquisar. Finalmente, ele desenvolve habilidades, como saber pensar, criar, de modo que possa continuar a aperfeiçoar as suas ideias e ações, sem estar vinculado a um sistema educativo. [12]

A utilização do construcionismo veio mostrar um outro nível de construção do conhecimento, onde o uso do computador nessa abordagem configura-se de maneira antagónica à inicialmente introduzida com o instrucionismo. [12]
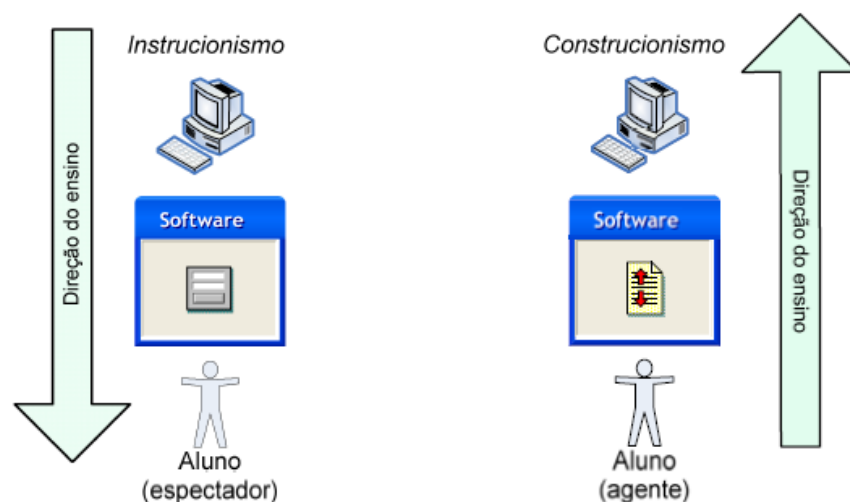
Figura 3.1- Linhas do ensino-aprendizagem através do computador [11]

A figura 3.1 apresenta as duas “linhas” do processo ensino-aprendizagem – instrucionismo e construcionismo – sugerindo uma comparação entre elas. Nota-se, em ambos os casos, a presença do computador, do aluno, e de um *software*. As diferenças estão no sentido do

ensino, no tipo de *software* utilizado, e na postura a ser adotada pelo utilizador dentro do processo. [12]

No instrucionismo o computador assume-se como uma máquina de ensinar e isso incorre, basicamente, na replicação dos métodos tradicionais de ensino, distinguindo apenas a forma de transmitir os conteúdos, que passam a ser mediados pelo computador. [12] No construcionismo de Papert o processo é invertido. O educando precisa assumir postura ativa no processo ensino-aprendizagem. Desta forma, os utilizadores constroem o seu próprio conhecimento. [19]

3.3- Etapas e Padrões de qualidade para o desenvolvimento de *software* educativo

O *software* educativo a ser desenvolvido deve satisfazer padrões definidos pela comunidade educacional. Neste tópico são apresentados alguns pontos que devem ser levados em consideração. [20]

Todos os programas de computador com caráter educativo deverão passar pelas seguintes etapas durante o seu ciclo de vida. Estas etapas incluem: [20]

- Conceção: consiste em projetar o *software* esclarecendo os assuntos e objetivos que se pretende atingir;
- Escolha do paradigma pedagógico: escolha de um paradigma pedagógico que indicará de que forma o *software* contribuirá para o utilizador na aprendizagem do assunto escolhido;
- Análise interdisciplinar: análise do *software* de forma a ir ao encontro de uma interligação entre conhecimentos de diferentes áreas;
- Implementação: desenvolvimento do *software* seguindo os objetivos, o paradigma pedagógico escolhidos nas fases anteriores.
- Validação: consiste na realização de testes ao *software* para determinar a sua eficácia.
- Implantação: fase final que consiste na distribuição do *software* para utilização.

Depois de delimitadas as etapas é importante proceder à definição de alguns aspetos importantes para a produção de *software*, que deve considerar alguns dos seguintes itens [21]:

a) Empenho do utilizador com o sistema

Neste contexto o programa deverá ser interativo, oferecendo ajuda e premiando um diálogo amigável, útil e fluido com o utilizador, não efetuando qualquer juízo de valor ao utilizador.

b) Controlo da aprendizagem

O controlo da aprendizagem deverá estar nas mãos do utilizador. Os programas educativos devem ser desenvolvidos de tal forma que o utilizador sinta que suas ações não

estão a ser limitadas pelo programa, e onde o utilizador deverá ser capaz de resolver o problema de acordo com a sua capacidade cognitiva.

c) O valor do erro

O valor do erro centra-se no fato de que, quando o utilizador não obtém resultados positivos, a resposta da aplicação deve ser neutra quanto à direção a ser seguida. Qualquer informação ou direção fornecida além da apropriada é vista como intervenção.

Para sinalizar os erros, há unanimidade de que estes devem ser assinalados imediatamente ou o mais rapidamente possível. Para a correção de erros, o utilizador deve poder rever facilmente a operação ou a linha onde se situa o erro e deve poder anular eventualmente na totalidade ou em parte o trabalho que foi feito depois deste.

d) Programação sólida e efetiva

O programa deve ser claro quanto aos seus objetivos e como estes são atingidos. Relativamente à *interface* deverá haver prudência no uso de cores, uma vez que estas podem-se tornar fontes de distração e dificultar o processo de aprendizagem por parte do utilizador.

e) Documentação

O *software* deverá possuir documentação de ajuda ao utilizador. Esta documentação deverá incluir um manual de utilização, tal como mensagens de erro e de aviso que poderão aparecer na interface, de tal forma que o utilizador seja capaz de entendê-la.

De acordo com a ISO/CEI 9126 as características que definem a qualidade de um *software* traduzem-se através dos seguintes itens: [22]

- Funcionalidade: conjunto de atributos que evidenciam a existência de um conjunto de funções e as suas propriedades específicas. As funções são as de satisfazem as necessidades explícitas ou implícitas do utilizador;
- Confiabilidade: conjunto de propriedades que evidenciam a capacidade do *software* em manter o seu nível de desempenho sob condições estabelecidas durante um período de tempo estabelecido;
- Usabilidade: conjunto de atributos que evidenciam o esforço necessário para se poder utilizar o *software*, bem como a opinião individual desse uso, por um conjunto de utilizadores;
- Eficiência: conjunto de atributos que evidenciam o relacionamento entre o nível de desempenho do *software* e a quantidade de recursos usados;
- Portabilidade: conjunto de atributos que evidenciam a capacidade do *software* ser transferido de um ambiente para o outro.
- Manutenção: conjunto de atributos que evidenciam o esforço necessário para fazer modificações no *software*.

É importante referir que, os itens aqui propostos, pretendem identificar certos aspetos necessários para a produção de um bom *software* educativo. Estes não devem ser todos satisfeitos já que seria impossível desenvolver um *software* que tivesse todas estas características. Por outro lado, a existência destas características não é condição suficiente

para produção de um bom *software*. A combinação dos diferentes aspetos sugeridos é que fazem um *software* ser mais interessante e efetivo que outro. [14]

3.4- Características ergonómicas da interface

Qualquer *interface*, gráfica ou não, o utilizador valoriza a facilidade com que consegue executar as tarefas pretendidas e a comodidade ao executá-las. Por isso, as questões chave na implementação de uma *interface* são: a sua finalidade e os seus utilizadores alvo. Assim, é preciso identificar as necessidades do utilizador e, a partir daí, criar uma *interface* útil, e agradável. [23]

A melhor forma de identificar as necessidades dos utilizadores é mantendo-os envolvidos em todo o processo de criação. Os utilizadores podem ser uma fonte de informação para o desenvolvimento da *interface* através de entrevistas, questionários ou da sua observação no local habitual de trabalho para determinar os aspetos que a *interface* deverá focar. Podem também ser consultados sobre decisões referentes ao aspeto da interface, sendo objeto de consulta, nas diferentes versões já implementadas ou ainda na fase de desenho. [23]

Essencialmente, o processo de desenvolvimento de uma interface envolve quatro atividades básicas: [24]

- Identificar necessidades: é necessário estudar o comportamento do utilizador de forma a moldar a *interface* às suas necessidades;
- Idealizar uma *interface* que responda às necessidades do utilizador;
- Construir versões interativas da *interface* para que possam ser utilizadas; Avaliar o que está a ser construído ao longo de todo o processo de desenvolvimento.

Estes passos complementam-se e devem ser repetidos tantas vezes quantas necessárias. Ao avaliar o que foi construído identificam-se novas necessidades e idealizam-se mudanças a efetuar na *interface* em questão, ou desenvolvem-se novos modelos de *interface*. [24]

Um outro ponto já referido na secção 3.3, importante para o desenvolvimento da interface é a usabilidade. A usabilidade compreende cinco componentes de qualidade: facilidade de aprendizagem, facilidade de memorização, eficiência, segurança e satisfação. [25] Outros autores adicionam também a eficácia e a utilidade. [24]

As sete componentes de qualidade inerentes ao termo usabilidade são então:

- Facilidade de aprendizagem: refere-se a quanto facilmente se aprende a usar uma *interface*;
- Facilidade de memorização: refere-se ao quão facilmente os utilizadores se recordarão do modo de utilização de uma *interface* depois de a terem aprendido a usar. Se as operações a aprender são ilógicas os utilizadores tendem a esquecer o que fazer se usarem poucas vezes a referida *interface*;
- Eficiência: mede a rapidez com que o utilizador realiza as suas tarefas, ou seja, mede o nível de produtividade;

- Segurança: envolve a proteção do utilizador de condições perigosas e situações indesejáveis. Há que prevenir que o utilizador cometa erros graves, reduzindo, por exemplo, o risco de ativação de botões ou teclas erradas;
- Satisfação: mede quanto os utilizadores apreciam uma *interface*;
- Eficácia: mede a adequação de uma *interface*, se a mesma permite a realização correta das tarefas a que se propõe;
- Utilidade: refere-se à capacidade da *interface* apresentar as funcionalidades certas para que o utilizador atinja os seus objetivos.

No campo da usabilidade devem ser considerados alguns princípios de *design*: [24]

- Visibilidade: a compreensão de uma *interface* depende, entre outros fatores, da ordenação, do posicionamento e da distinção dos objetos (imagens, texto, botões, etc.), pois os utilizadores vão apreender mais facilmente os diferentes itens se estes forem apresentados de modo organizado e bem visível;
- Feedback (ação/reação): a *interface* deve reagir às ações do seu utilizador. Ao pressionar um botão, por exemplo, espera-se que uma certa funcionalidade seja ativada e o tempo de resposta apropriado e consistente com a funcionalidade envolvida;
- Restrições: respeitam à determinação de maneiras de restringir a interação num determinado momento. Em *interface* gráfica é usual desativar certas opções de um menu, restringindo assim o utilizador às ações permitidas nesse estágio da atividade;
- Consistência: operações semelhantes devem ter processos idênticos. Se um botão azul abre um documento e um verde o grava, noutra situação o botão azul pode mostrar um gráfico e o verde gravá-lo, por exemplo;
- Atribuição correta: refere-se aos atributos de um objeto que permitem a um utilizador saber como o usar. Por exemplo, um campo em branco sugere a ação “escrever aqui”, enquanto que um botão traduz “clicar aqui”.

Qualquer utilizador quer sistemas de fácil aprendizagem e utilização, para além de eficazes, eficientes e seguros. Para que todas estas exigências sejam satisfeitas de forma adequada, é preciso avaliar a *interface* em desenvolvimento antes de a considerar como terminada. [23]

Ao implementar uma *interface*, o construtor não deve assumir que os utilizadores são iguais a ele, nem presumir que o fato de estar a seguir todas as regras existentes para a excelente execução da *interface* é garantia de uma boa usabilidade da mesma. Daí que avaliação é sempre necessária pelas quatro razões que se seguem [26]:

- Perceção do mundo real: conhecer o modo como os utilizadores utilizam o *software* nos seus locais de trabalho e tentar aperfeiçoar o seu design para que se adapte melhor ao ambiente em questão.
- Comparação de *designs*: ocasionalmente, o desenhador de uma *interface* quer comparar dois ou mais *designs* de modo a perceber qual será melhor para, por exemplo, evidenciar as tarefas mais importantes;

- Construção com um objetivo: ao desenhador é dado um objetivo e a sua meta é garantir que o seu produto o atinge, onde é através da avaliação que se sabe se a missão pretendida foi ou não cumprida;
- Conformidade com um padrão: se o *software* a desenvolver pertence ou vai ser vendido a uma empresa, há certos padrões dessa empresa que devem ser levados em atenção, como o logótipo, por exemplo.

A utilização dos computadores como recurso didático é um caminho irreversível, tendo em vista a crescente versatilidade do *software* educativo, e a sua capacidade para modelar e simular sistemas reais. Contudo salienta-se que, a principal função destas ferramentas computacionais didáticas não é substituir a figura de um educador ou orientador no processo educativo, mas sim auxiliar o formando no processo ensino-aprendizagem. [26]

3.5- Considerações Finais

Neste capítulo foi exposto a forma como um *software* educativo pode contribuir para a construção do conhecimento. Foi feita uma pequena revisão às referências pedagógicas que orientam o desenvolvimento deste tipo de programa, onde se deu particular enfâse ao paradigma do construcionismo. Com o construcionismo o utilizador do *software* constitui um elemento ativo na busca pelo conhecimento, permitindo desenvolver competências para um dado conteúdo. De entre os tipos de programas educativos existentes, o *software* do tipo simulação permite uma aprendizagem por descoberta, enquadrando-se no paradigma construcionista.

Foi ainda desenvolvido neste capítulo as etapas e alguns aspetos que deverão ser considerados para o desenvolvimento de *software*, tal como os padrões de qualidade definidos pela ISO/CEI 9126, importantes para a implementação do código.

Concluiu-se que a *interface* constitui um ponto importante, onde deve ser fácil de utilizar mas eficaz, intuitiva mas eficiente, e deve complementar adequadamente o potencial de um programa educativo.

Capítulo 4

Programa Educacional para o Desenho de Subestações - Seedu

O programa Seedu – Programa Educacional para Desenho de Subestações- tem como objetivo fornecer aos engenheiros os fundamentos de análise necessários para dimensionamento das subestações, dotando-os de capacidade de análise critica a diferentes soluções. O Seedu assume-se como uma ferramenta no qual o utilizador constrói o seu conhecimento, incentivando a autonomia e permitindo-o atuar em situações desafiadoras e problematizadoras.

O presente capitulo tem como objetivo mostrar as características do Seedu, tal como o *software* se encontra arquitetado, as suas funcionalidades, desde a *interface*, base de dados e algoritmos de cálculo implementados.

4.1- Caracteristicas Educativas do Seedu

Para o desenvolvimento do Seedu seguiu-se como referência pedagógica, o Construcionismo desenvolvido pelo pesquisador em Educação e Tecnologias da Informática, Seymour Papert. O Construtucionismo de Papert é baseado nas teorias de Jean Piaget, apresentando a vantagem de transformar o processo de ensino-aprendizagem através do uso do computador numa ferramenta que propicia ao educando condições concretas para explorar o seu potencial intelectual, desenvolvendo ideias nas mais diferentes áreas do conhecimento. [27]

No que concerne ao tipo de *software* o Seedu é do tipo simulação. Este tipo de programa possibilita a vivência de situações difíceis ou até perigosas de serem reproduzidas em ambiente real. A simulação permite a emulação de uma situação real, a partir de um modelo. Através da simulação é possível determinar como o sistema responderá a mudanças na sua estrutura ou ambiente, auxiliando o utilizador a encontrar respostas às questões importantes e, portanto, torna a simulação uma técnica útil e poderosa para a solução de problemas. [27]

4.2- Funcionalidades do programa

O programa desenvolvido permite efetuar o cálculo automático para o dimensionamento de subestações, contra os esforços mecânicos e térmicos devido às correntes de curto-circuito em subestações.

O *software* foi desenvolvido em linguagem de programação Java, recorrendo ao IDE NetBeans. Esta é uma linguagem de programação orientada a objetos, dinâmica, possuindo a vantagem de ser multiplataforma, que permite que o código seja executado em qualquer sistema operativo. [28] Com a linguagem de programação Java foi possível desenvolver um código dividido em pacotes de classes, em que faz uma separação da *interface*, com a base de dados e separa também as funções de cálculo para cada tipo de condutor. Esta separação permite que qualquer alteração numa determinada função seja possível sem colocar em causa a funcionalidade do programa, possibilitando assim, sempre que desejado, efetuar manutenções ao *software*.

Dado que se pretende que este programa tenha um carácter educativo, foi desenvolvida uma *interface* que permite o seu fácil manuseamento e interação intuitiva. A *interface* do Seedu encontra-se estruturada de acordo com o fluxograma da figura 4.1.
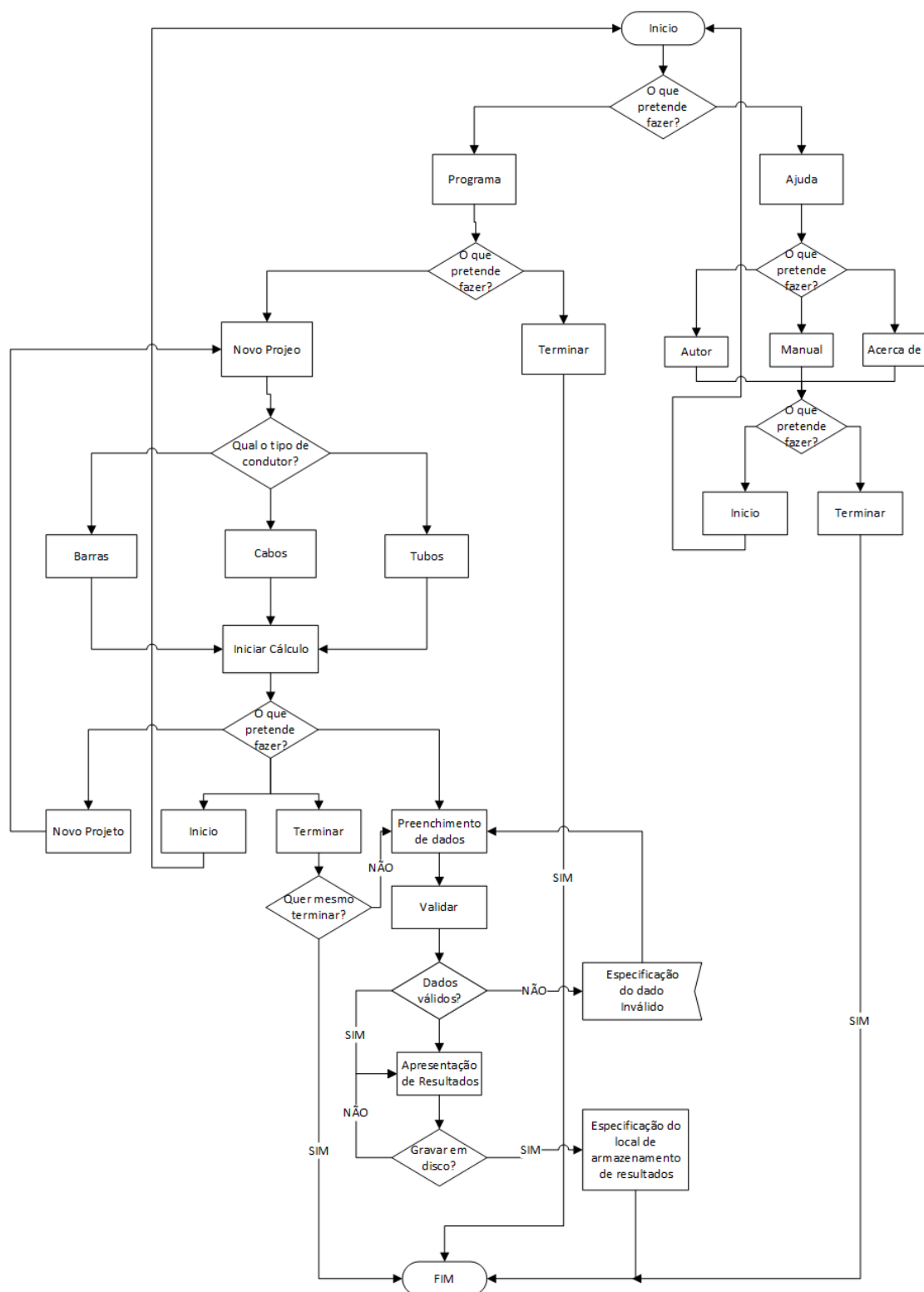
Figura 4.1- Fluxograma de utilização do Seedu

A *interface* quando inicializada possui um programa de cálculo e um menu de ajuda, como mostra a figura 4.2.

Figura 4.2- Interface gráfica

O menu "Programa" permite a seleção do cálculo consoante o tipo de condutor: Barras, Tubos ou Cabos, como mostra a figura 4.3. Para cada tipo de condutor selecionado, existe uma interface de introdução de dados.

Figura 4.3- Escolha de condutor na interface

Cada interface de introdução de dados apresenta vários separadores organizados consoante as características do curto-circuito; as características do barramento; as características do condutor e suportes, como mostra a figura 4.4. Todos estes separadores

permitem o preenchimento de dados relativos ao curto-circuito e equipamentos da subestação que se pretende analisar.

De forma a permitir uma interatividade com o utilizador, proporcionando a sua aprendizagem, o utilizador pode obter o conhecimento relativamente ao significado das variáveis expostas na *interface*, passando o rato por cima da variável (como mostra a figura 4.4), ou então consultando o menu ajuda, o qual poderá consultar o manual do utilizador. O menu ajuda permite ao utilizador aprender a usar o programa de forma correta, dando também informação sobre o significado dos campos a introduzir na *interface*, tal como uma interpretação simplificada dos resultados.

Figura 4.4- *Interface* gráfica (introdução de dados)

Depois de preenchidos todos os campos necessários para o cálculo pretendido, se eventualmente o utilizador introduzir valores inválidos na *interface*, surgirá uma mensagem de erro, alertando ao utilizador quais os dados inválidos, como se pode ver pela figura 4.5. Esta funcionalidade permitirá ao utilizador reintroduzir os dados de novo corretamente, para que o *software* possa validá-los e prosseguir com os cálculos.
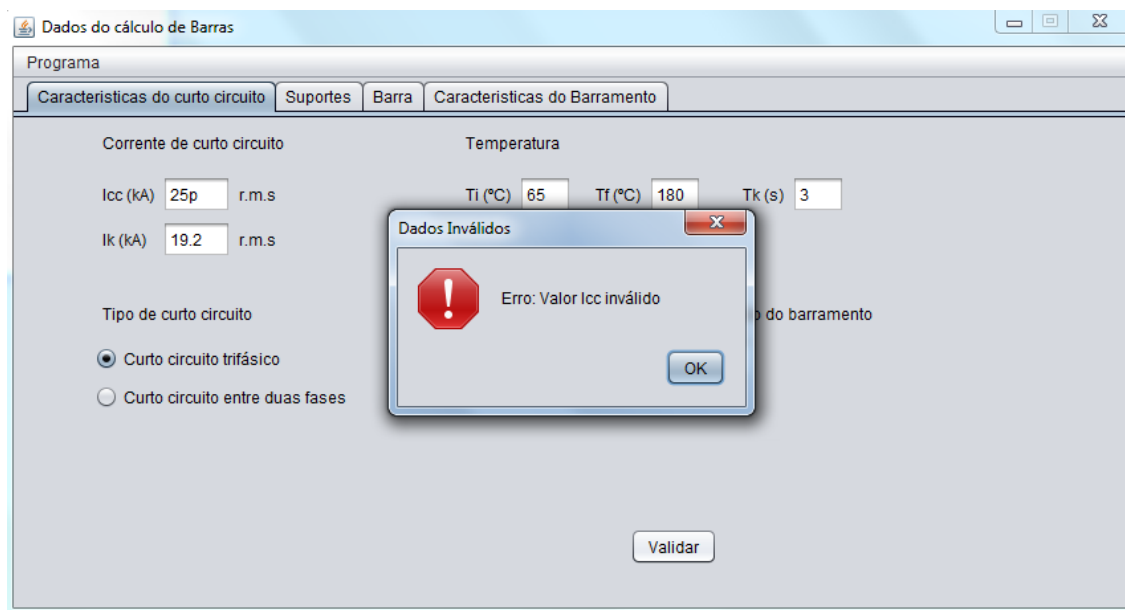
Figura 4.5- Erro na introdução de dados na *interface*

Porém, se eventualmente os dados estiverem inseridos e validados, o programa calculará os respetivos esforços mecânicos e térmicos, de acordo com os algoritmos desenvolvidos. De salientar que mesmo depois de premir o botão "Validar", o utilizador poderá voltar à *interface* de introdução de dados e alterar os dados, sem que tenha que fechar e abrir o programa de novo, e sem que tenha de introduzir todos os dados novamente. O *software* está também programado, para que em qualquer momento seja possível, mudar de programa de cálculo ou sair da aplicação, no qual surgirá a mensagem de confirmação da figura 4.6.
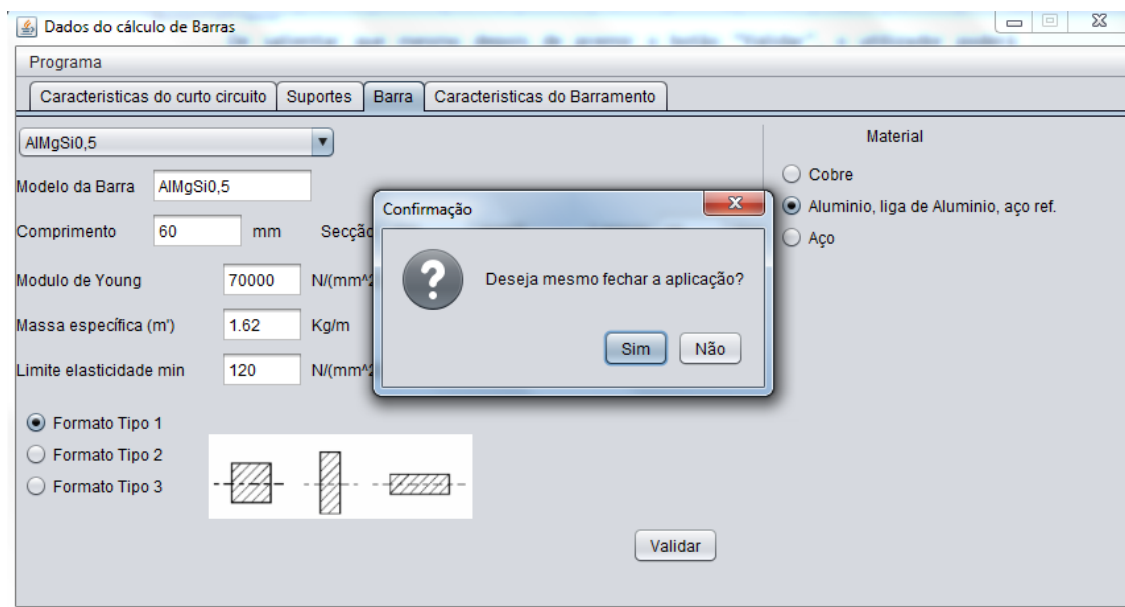
Figura 4.6- Mensagem de confirmação para terminar a aplicação

Após a validação dos dados, serão apresentados os principais resultados dos cálculos ao utilizador através da *interface*, onde será exposto também as principais conclusões do cálculo. Assim, dependendo do tipo de condutor escolhido para dimensionamento, serão exibidos os valores das principias forças que exercem nos condutores e/ou suportes,

frequências e conclusões relativas aos esforços térmicos, como mostra a figura 4.7. Salienta-se também, que no caso de os equipamentos não resistirem aos efeitos mecânicos ou térmicos aparecerá na *interface* de apresentação de resultados o símbolo de perigo.

Figura 4.7- Resultados do cálculo de Cabos

O utilizador poderá ter acesso a alguns dos cálculos efetuados pelo programa, através do botão "Gravar em disco", disponível na *interface* de apresentação de resultados, como mostra a figura 4.7 e 4.8. Assim, será gerado um ficheiro de texto, que poderá ser guardado numa pasta escolhida pelo utilizador. Estes resultados constituem resultados de cálculos intermédios efetuados pelo programa, onde o utilizador poderá compará-los com os seus cálculos manuais.
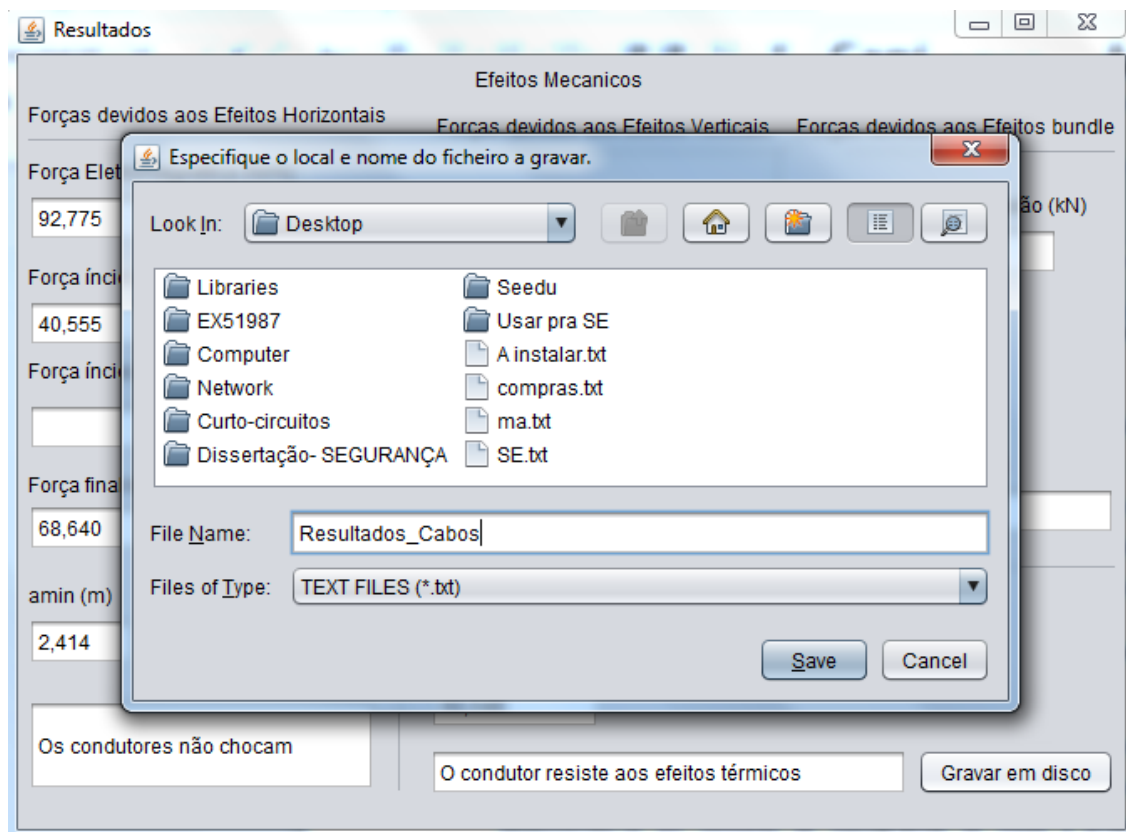
Figura 4.8- Gravar dados em disco

4.2.1 - Base de Dados do Seedu

O programa Seedu é constituído por uma base de dados onde poderão ser testadas várias configurações de subestações, comparando o desempenho de diferentes modelos de equipamentos, consoante diferentes características de curto-circuitos. A base de dados foi desenvolvida em SQLite, pois para além de ser livre e simples, permite que seja usada sem a necessidade de recorrer um servidor externo.

A base de dados é constituída por quatro tabelas: Tubos, Barras, Cabos e Suportes, como mostra a figura 4.9. Nestas tabelas encontrar-se-ão os registos que contêm cada um dos campos, de acordo com a figura 4.9. Estes campos deverão ser preenchidos sempre que se pretenda adicionar novo material na base de dados.

TUBOS

- Modelo : VARCHAR(20)
- Diametro Exterior : DOUBLE
- Diametro Interior : DOUBLE
- Secção : DOUBLE
- Modulo de Young : DOUBLE
- Elasticidade Mínima :INTEGER
- Massa Especifica :DOUBLE
- X :DOUBLE
- R :DOUBLE

BARRAS

- Modelo : VARCHAR(20)
- Comprimento da barra : INTEGER
- Largura da barra : INTEGER
- Secção : DOUBLE
- Modulo de Young : DOUBLE
- Elasticidade Mínima :INTEGER
- Massa Especifica :DOUBLE
- X :DOUBLE
- R :DOUBLE

CABOS

- Modelo : VARCHAR(20)
- Secção : DOUBLE
- Modulo de Young : DOUBLE
- Fst_60º : INTEGER
- Fst_20º : INTEGER
- X : DOUBLE
- R : DOUBLE
- Massa Especifica :DOUBLE

SUPORTES

- Modelo : VARCHAR(20)
- Força Maxima do suporte : DOUBLE

Figura 4.9- Diagrama da base de dados

A base de dados permite carregar, adicionar e remover equipamentos (suportes e condutores), funcionalidades que se podem ver através do fluxograma da figura 4.10.
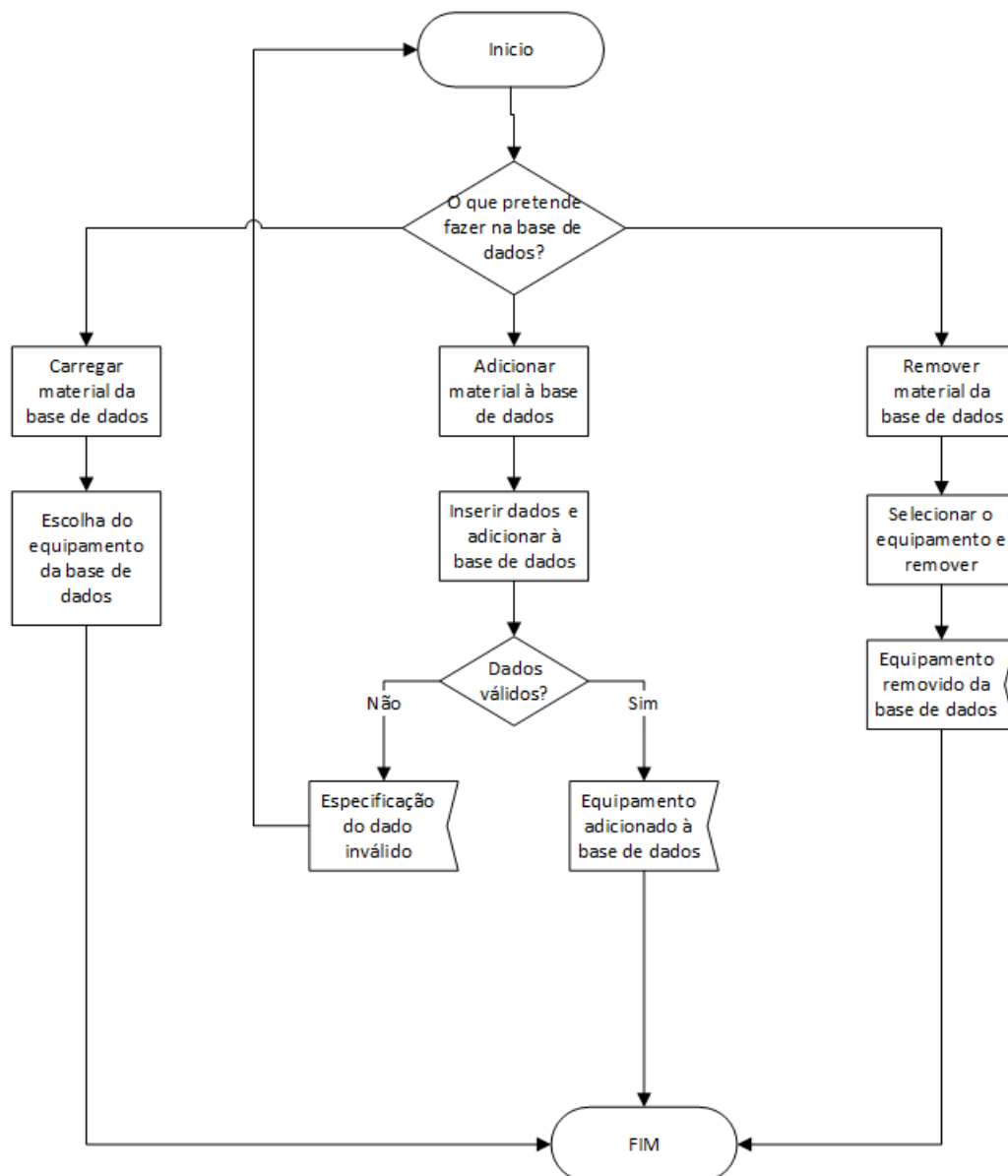
Figura 4.10- Fluxograma de utilização da base de dados do Seedu

Para adicionar material na base de dados, o utilizador terá que preencher todos campos relativos a esse material, seguindo do botão "Adicionar". De modo semelhante, acontece no caso de o utilizador desejar remover, no qual deverá selecionar o equipamento e posteriormente selecionar o botão "Remover", como de pode verificar pela figura 4.11.

Figura 4.11- Adicionar e remover material à base de dados

De forma a evitar que na base de dados sejam inseridos valores impossíveis de serem lidos, equipamentos com nomes iguais, ou campos sem preenchimento, surgirá uma mensagem de erro ao utilizador indicando qual o campo com valor inválido, ou se existe já algum registo com o mesmo nome. Como mostra a figura 4.12 a utilização de vírgula como separador decimal na força máxima do suporte A, não permitiu a introdução do equipamento, sendo alertado o utilizador para esse fato.

Figura 4.12- Erro na introdução de dados na base de dados

Como se pode constatar pela figura 4.13, uma tentativa de introdução de um condutor no programa de cálculo de Barras, com um nome igual a um já existente na base de dados, impossibilitou a introdução do equipamento. Neste caso é também alertado o utilizador que o equipamento não foi introduzido e descrito o motivo que conduzir à não inserção do equipamento na base de dados.
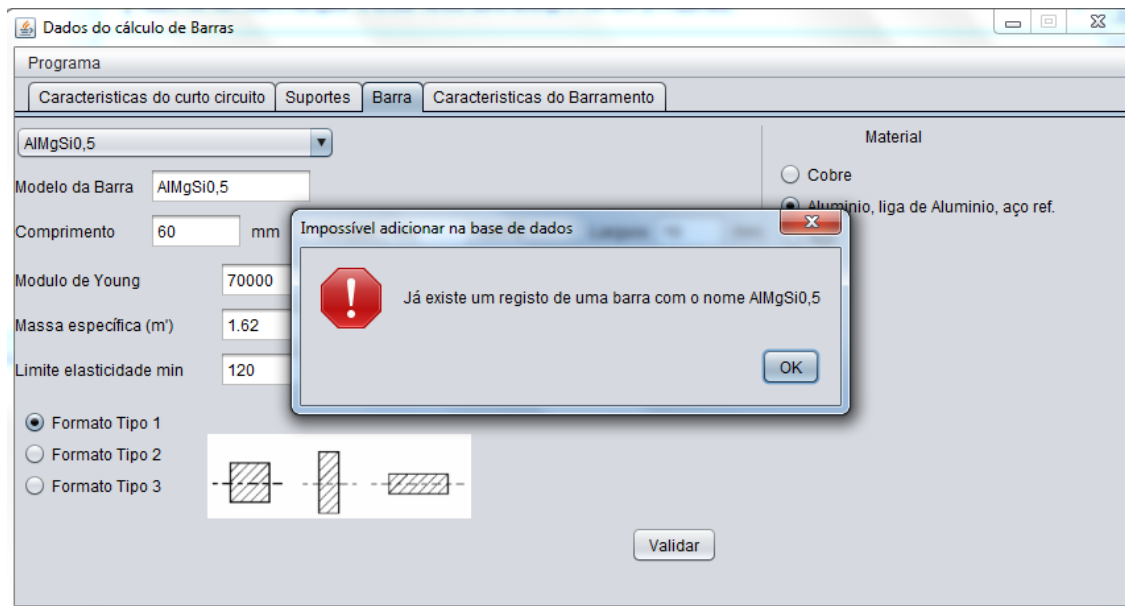
Figura 4.13- Erro na introdução de uma barra na BD

Contudo, se os dados inseridos na base de dados estiverem todos corretamente introduzidos, será enviado ao utilizador uma mensagem informando-o que um determinado material foi adicionado à base de dados com sucesso, como se pode verificar pela figura 4.14.
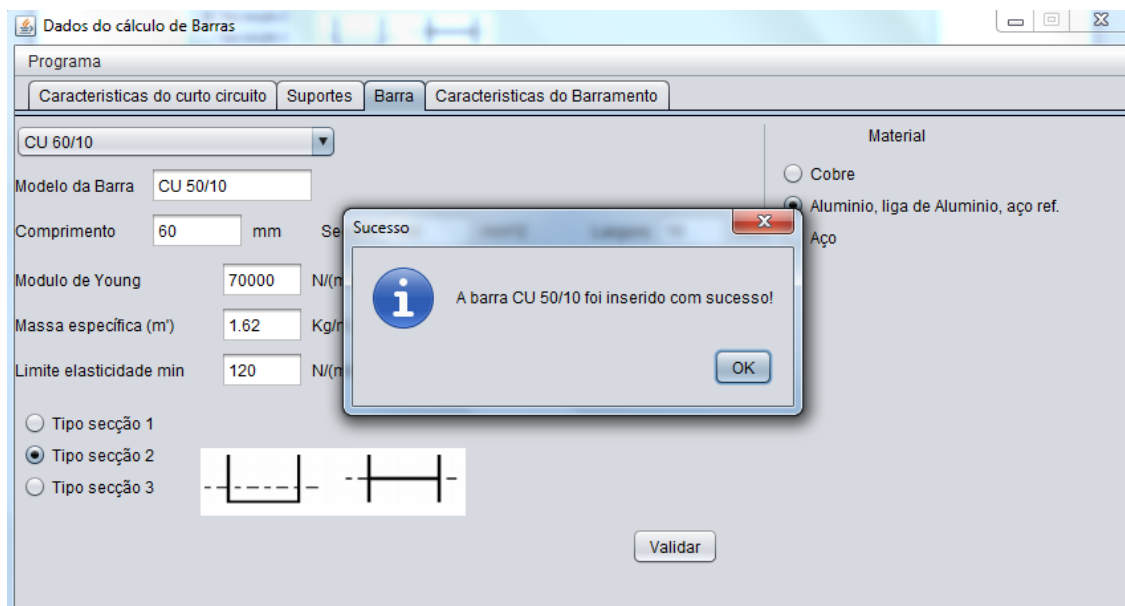
Figura 4.14- Material inserido na base de dados

De modo análogo surgirá também uma mensagem no caso de o material selecionado for removido, como se pode verificar na figura 4.15.
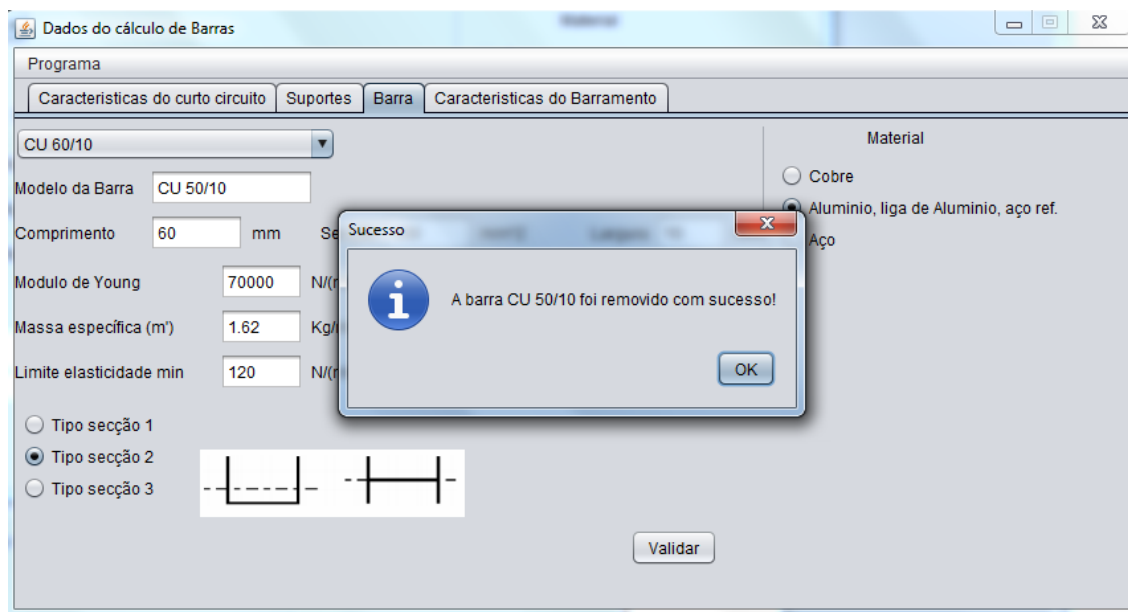
Figura 4.15- Material removido da base de dados

Para além de ser possível remover e adicionar material, o utilizador poderá selecionar qual o equipamento que pretende testar, onde automaticamente serão preenchidos todos os campos relativos a esse equipamento.

Devido à complexidade dos cálculos efetuados pelo programa, que variam consoante o equipamento a analisar, tipo de curto-circuito e com a configuração da subestação, desenvolveu-se um conjunto de fluxogramas de modo a propiciar uma rápida visualização dos cálculos envolvidos no dimensionamento.

4.3- Fluxogramas de cálculo

Para o cálculo automático foram desenvolvidos três fluxogramas, um relativo às Barras, outro para os Tubos e outro para os Cabos Flexíveis. Os fluxogramas representados constituem de uma forma simplificada uma sequência de cálculos usados para o dimensionamento de subestações, sendo percorridos pelo *software* de acordo com os dados previamente introduzidos.

4.3.1 - Algoritmo de cálculo dos condutores rígidos - Barras

Nas Figuras 4.16 e 4.17 estão representados de forma simplificada os algoritmos de dimensionamento das Barras. Nestes é possível observar de uma forma sequencial o encadeamento dos principais cálculos efetuados pelo programa para este tipo de condutor.
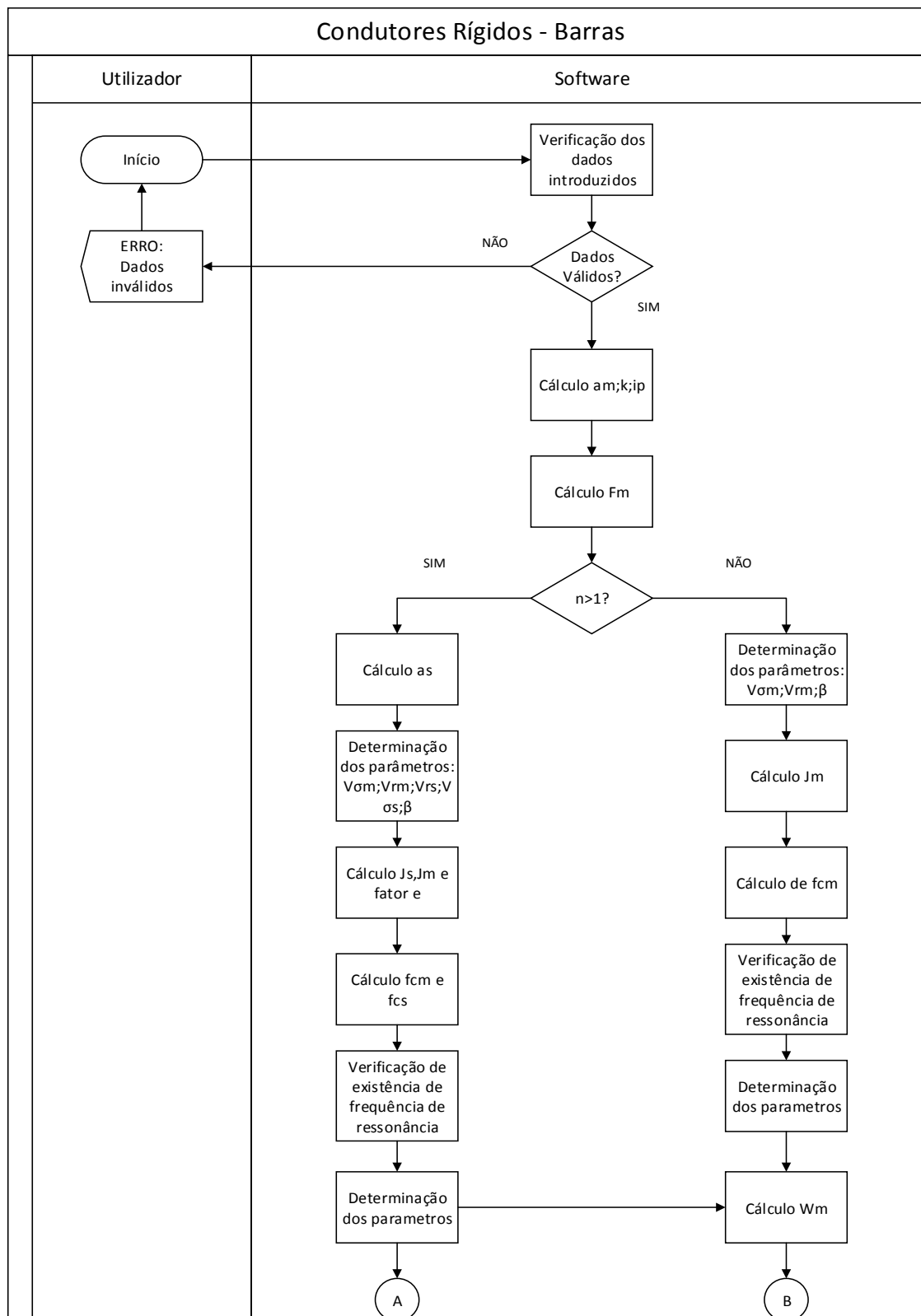
Figura 4.16- Algoritmo de cálculo das Barras
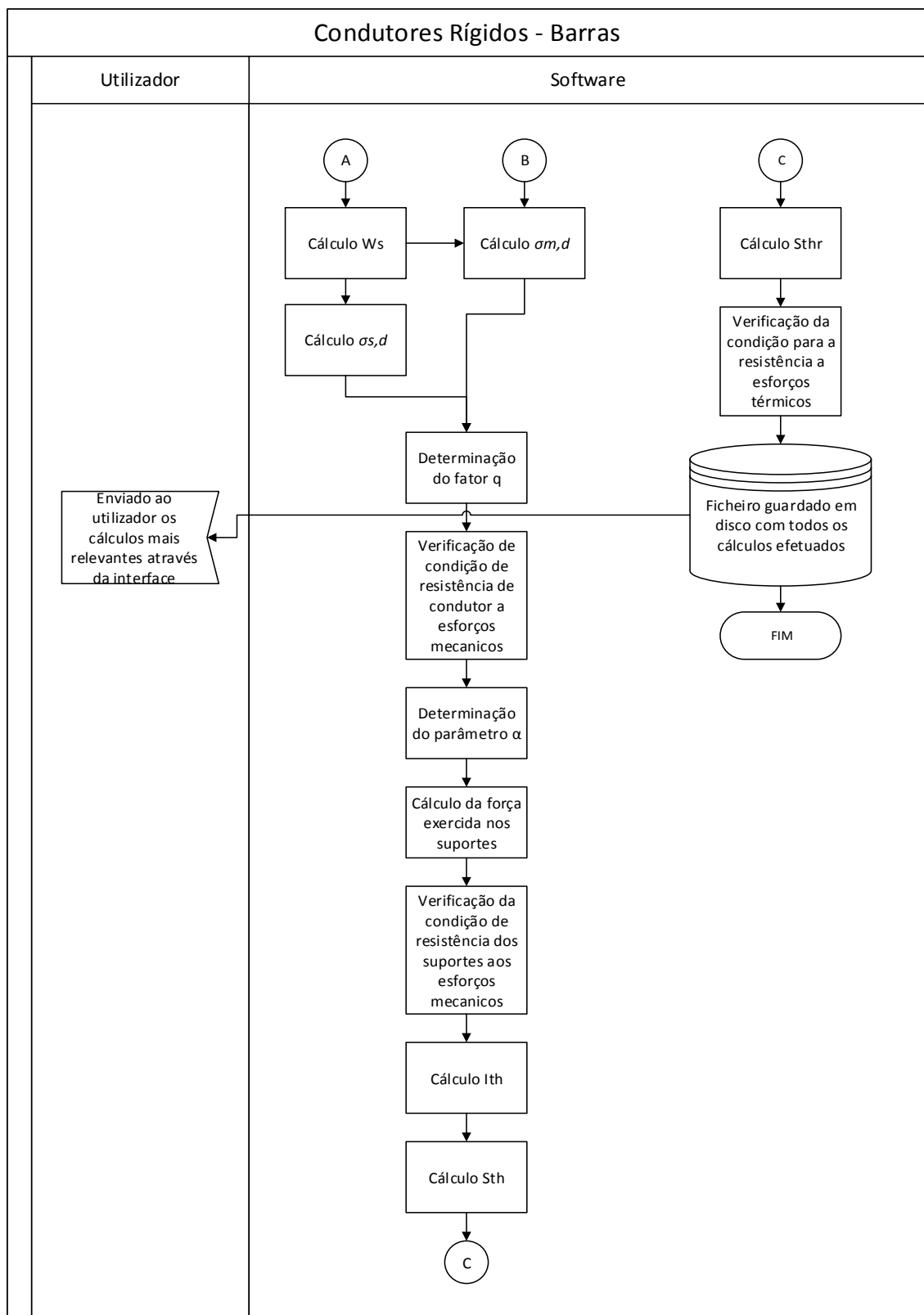
Figura 4.17- Algoritmo de cálculo das Barras (continuação)

4.3.2 - Algoritmo de cálculo dos condutores rígidos – Tubos

Nas figuras 4.18 e 4.19 encontram-se os algoritmos desenvolvidos para o cálculo dos esforços mecânicos e térmicos, resultantes da corrente de curto-circuito para os condutores rígidos tubulares.
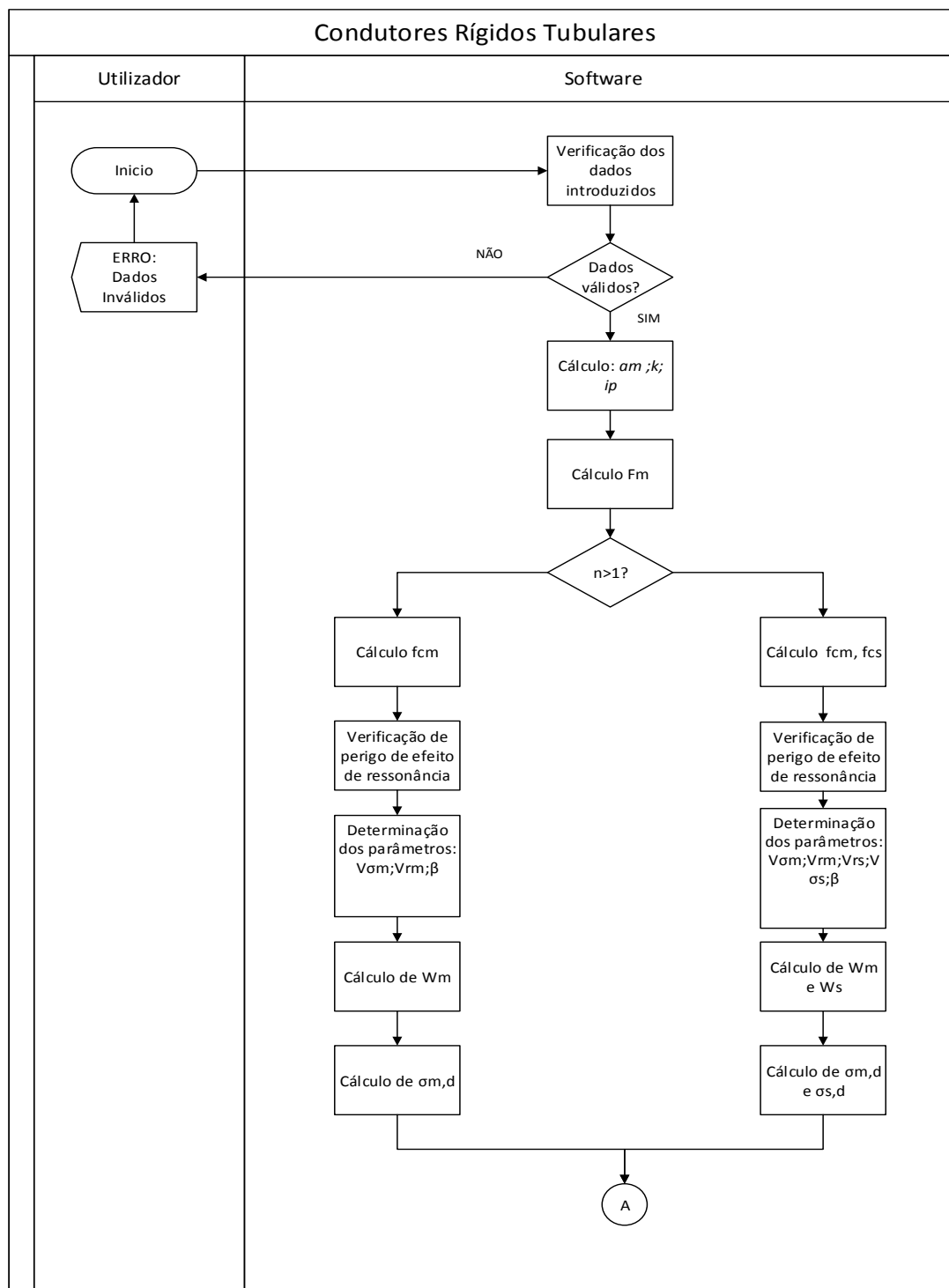
Figura 4.18- Algoritmo de cálculo dos condutores rígidos tubulares
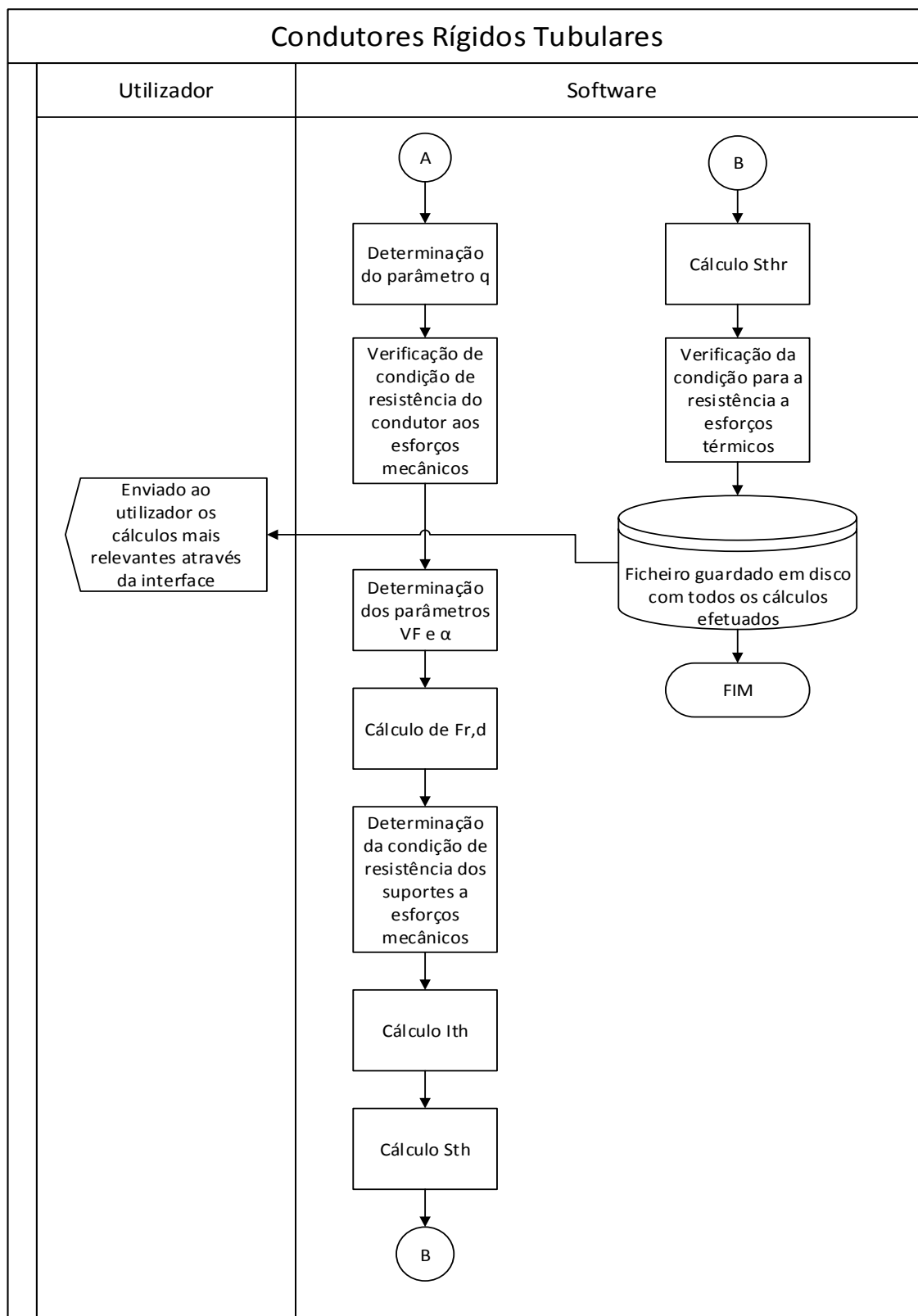
Figura 4.19- Algoritmo de cálculo dos condutores rígidos tubulares (continuação)

4.3.3 - Algoritmo de cálculo dos condutores flexíveis

Relativamente aos condutores flexíveis, encontram-se representados nas figuras 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23 os algoritmos de cálculo percorridos pelo programa desenvolvido.
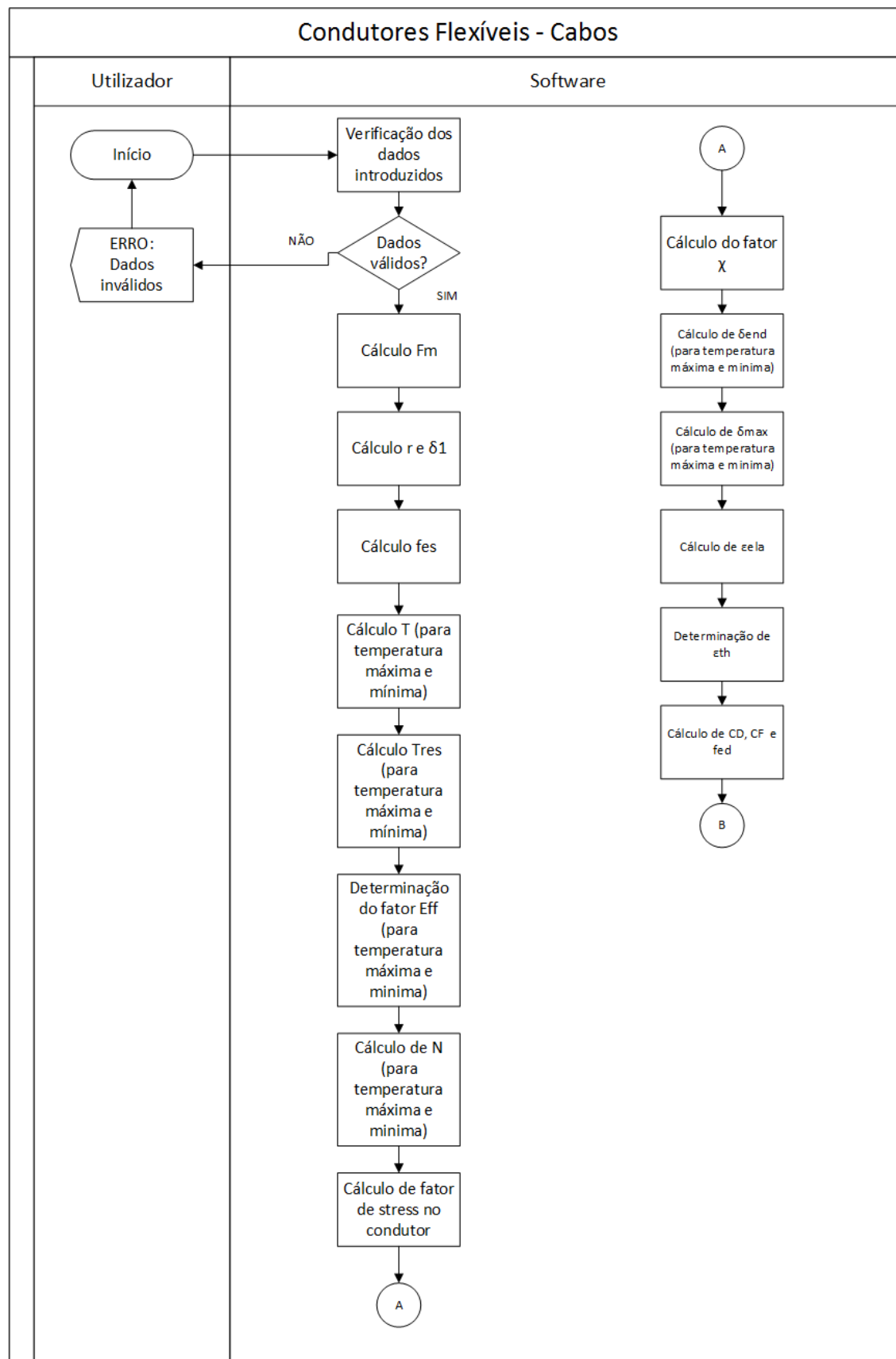
Figura 4.20- Algoritmo de cálculo de cabos flexíveis
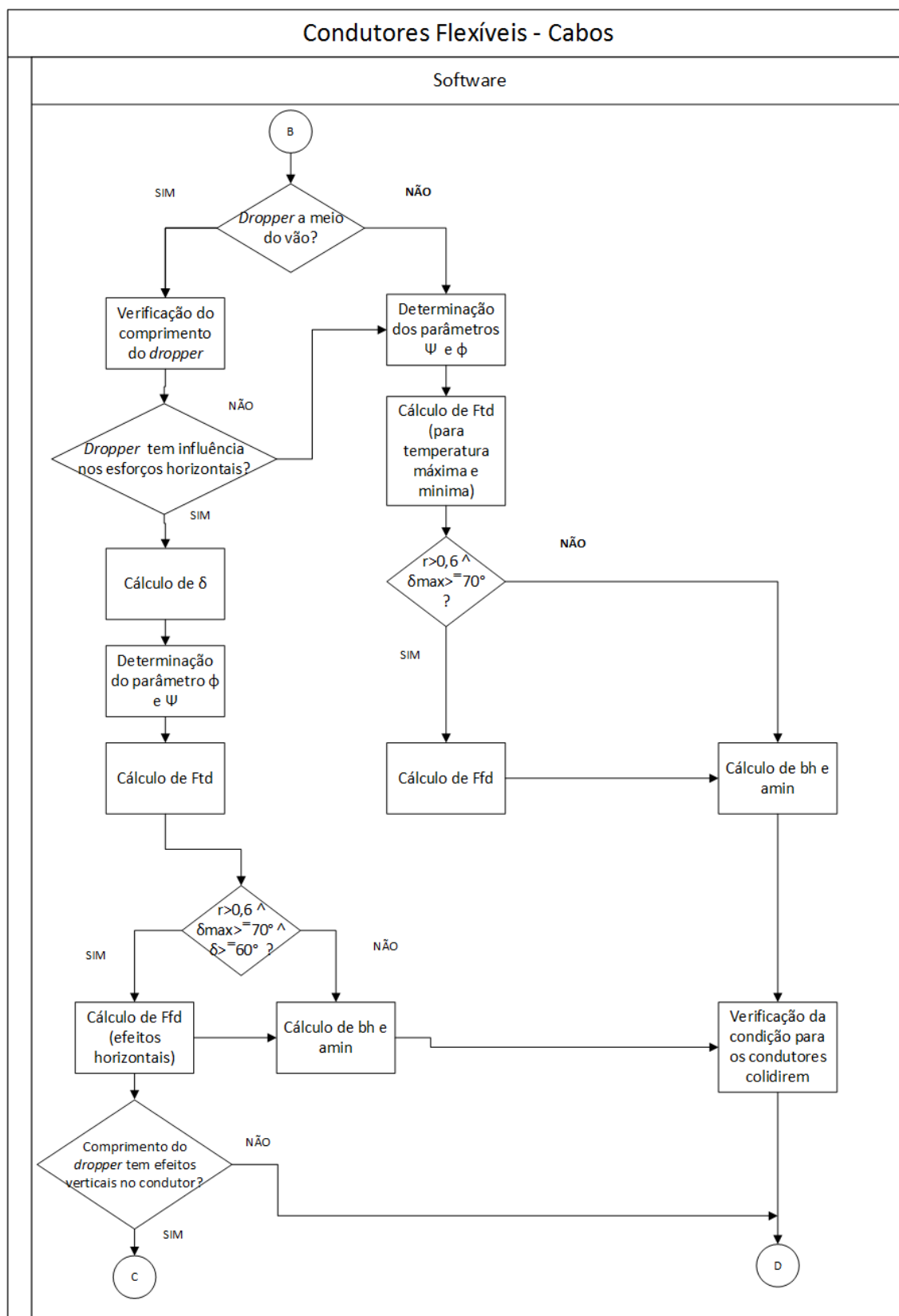
Figura 4.21- Algoritmo de cálculo de cabos flexíveis (continuação)
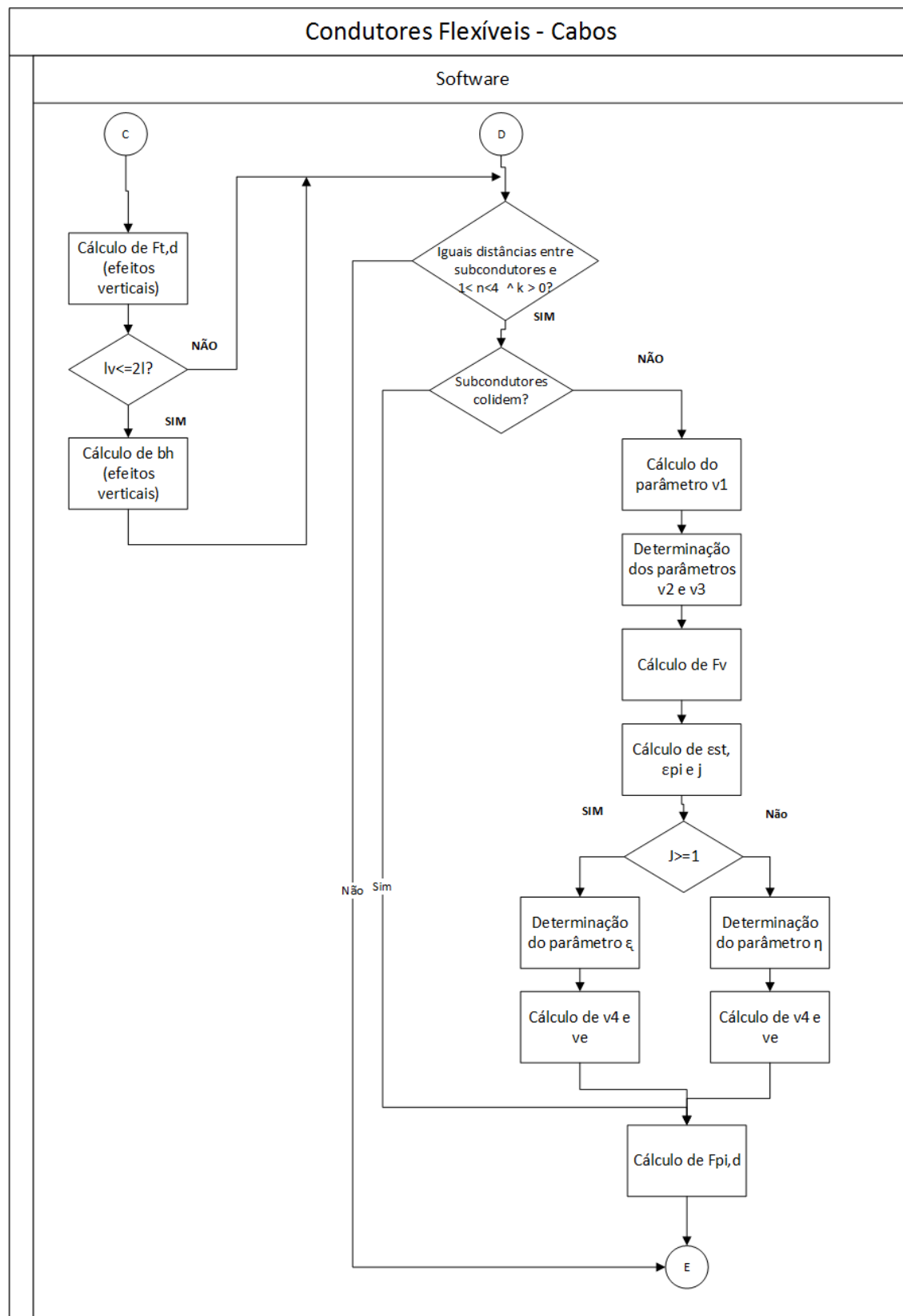
Figura 4.22- Algoritmo de cálculo de cabos flexíveis (continuação)
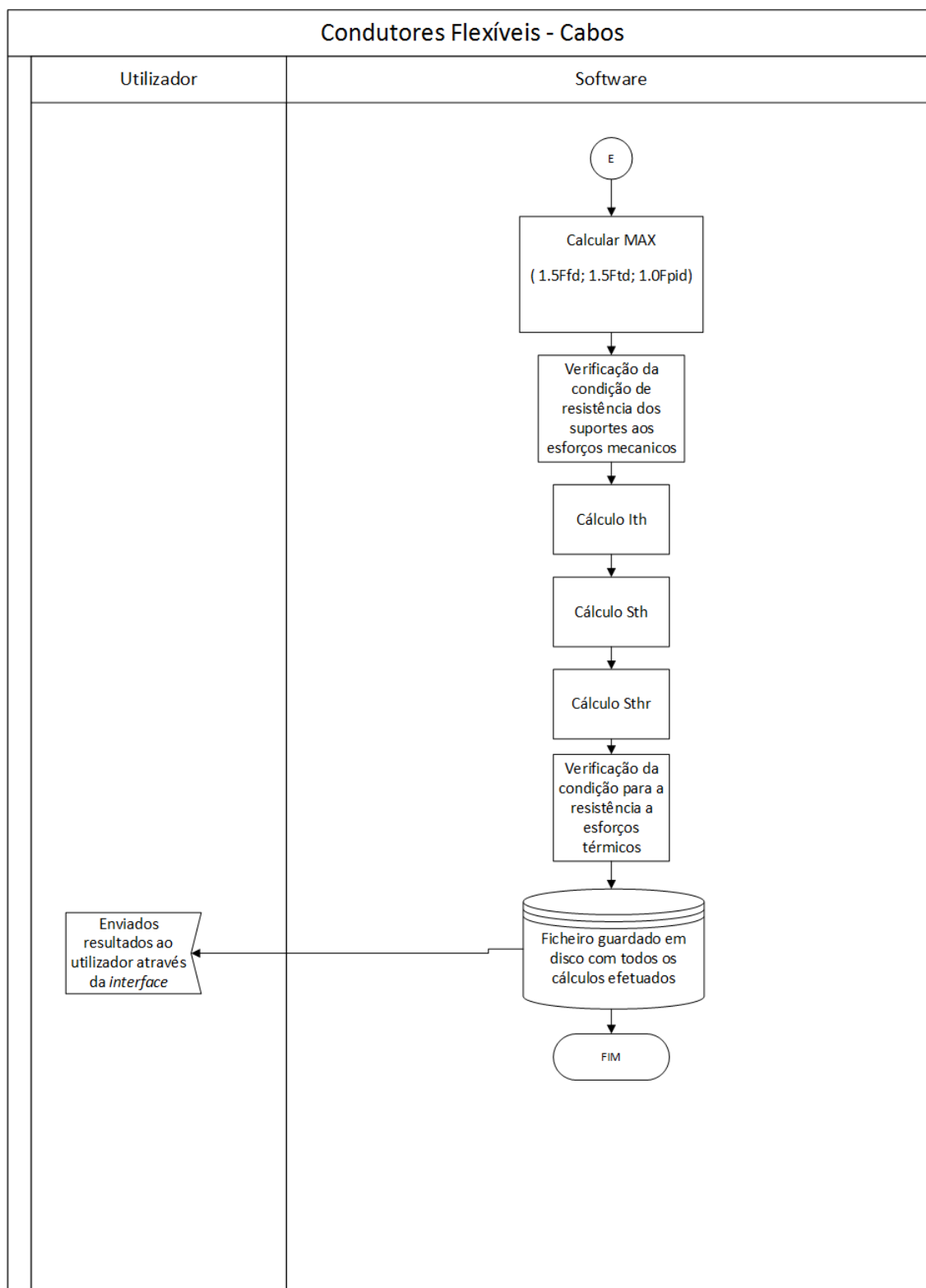
Figura 4.23- Algoritmo de cálculo de cabos flexíveis (continuação)

Todos os fluxogramas expostos na secção 4.3 deste capítulo constituem os principais cálculos efetuados pelo programa. Através destes fluxogramas é possível ao *software* desenvolver todo um conjunto de cálculos que permitirá fazer a análise que os efeitos dos curto-circuitos têm nos diversos equipamentos de uma subestação.

4.4- Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a fundamentação pedagógica que apoiou todo o desenvolvimento do Seedu, tal como a escolha do tipo de *software* educativo. De referir que, uma referência pedagógica é sempre indispensável para a construção de um *software* educativo, onde se considerou que um *software* do tipo simulação seria o mais indicado.

Foram apresentadas as funcionalidades do Seedu e os algoritmos de cálculo que apoiaram todo o desenvolvimento do programa. De salientar que, os algoritmos de cálculo estão apresentados de forma simplificada, dado que existem diversos cálculos intermédios para se determinar os vários parâmetros de cálculo e forças que são aplicadas nos equipamentos.

Capítulo 5

Software Seedu: Caso de Estudo

Neste capítulo será apresentado um exemplo de cálculo sem recurso ao Seedu e com recurso ao Seedu, de forma a testar alguns equipamentos de uma subestação tipo da EDP Distribuição, cuja planta da subestação encontra-se no Anexo 1. Através dos cálculos efetuados serão avaliados os esforços mecânicos e térmicos a que alguns equipamentos e condutores estão sujeitos quando ocorre um curto-circuito na subestação. Posteriormente comparar-se-ão os resultados obtidos com recurso ao Seedu e aqueles que foram obtidos sem recurso ao Seedu, de forma a verificar se os resultados são coincidentes e validar o programa desenvolvido.

5.1- Exemplo de cálculo sem recurso ao *software* Seedu

Para efetuar o cálculo sem a ajuda do Seedu deverá ser feita a análise da subestação troço a troço. Assim a título de exemplo, será analisado um cabo flexível, um tubo e uma barra. Para tal, simular-se-á uma corrente de curto-circuito trifásica que flui ao longo de todo o cabo, com as características descritas na tabela seguinte.

Tabela 5.1 Característica da corrente de curto-circuito

I_{cc} (kA)	I_k (kA)	T_k (s)	Tipo de curto-circuito	θ_b (ºC)	θ_e(ºC)
25	19,2	3	Trifásico	65	180

5.1.1 - Cálculo dos esforços mecânicos

Nesta secção serão calculados os esforços mecânicos a que os condutores estão sujeitos quando ocorre uma corrente de curto-circuito, com as especificações descritas na secção 5.1. Estes esforços serão calculados para o cabo flexível existente entre a linha de alta tensão e o transformador de intensidade, para o barramento de alta tensão e para o barramento de média tensão.

- Cabo flexível entre a linha AT e o TI

Será feita a análise de um condutor flexível existente entre a linha AT e o TI. As características do cabo e da subestação encontram-se definidas nas tabelas 5.2, 5.3 e 5.4.

Tabela 5.2 - Características do cabo flexível

Modelo do cabo	Material	Massa Especifica (Kg/m)	Secção (mm^2)	Módulo de Young (N/mm^2)	$F_{st(-20)}$ (k/N)	$F_{st(60)}$ (k/N)	Diâmetro do Subcondutor (mm^2)
Aster 336	Alumínio	1.009	366,22	58124	0,330	0,200	24,9

Tabela 5.3- Características do cabo flexível (continuação)

Resistência do Condutor (Ω/km)	Reatância do condutor (Ω/km)
0,0908	0,316

Tabela 5.4 -Configuração e distâncias dos cabos na subestação

Distância entre suportes (m)	Número de subcondutores	Distância entre subcondutores (m)	Espaçamento entre condutores (m)
1,8	2	0,1	1,5

Todos os condutores são submetidos a forças eletromagnéticas que podem causar deformação mecânica permanente, quando aplicada uma corrente de curto-circuito e esta for elevada. Portanto, saber o valor desta força é importante, e constituirá o primeiro cálculo a efetuar. O cálculo da força eletromagnética depende do tipo de condutor, dos seus suportes e da existência ou não de derivação a meio do condutor. Assim, como se trata de um curto-circuito trifásico e, o cabo não tem qualquer derivação a meio do vão, e estando os condutores não tracionados (e portanto$l_c = l$) a força eletromagnética deverá ser calculada de acordo com a expressão Eq.5.1, em $\mathrm{N/m}$.

$$\boldsymbol{F' = \frac{\mu_o}{2\pi} \times 0,75 \times \frac{(I_{cc})^2 \times l_c}{a \times l} \approx 62,5\,\frac{N}{m}} \qquad \text{Eq. 5. 1}$$

Seguidamente será calculado o rácio da força eletromagnética. Este estabelece a relação entre a força eletromecânica sobre um condutor devido a um curto-circuito, e a força da gravidade. Esta relação é adimensional e, calculada segundo a expressão matemática Eq.5. 2.

$$\mathbf{r = \frac{F'}{n \times m'_s \times g} \approx 3.157} \qquad \text{Eq.5. 2}$$

Este rácio é essencialmente calculado para posteriormente se obter a direção da força resultante, que é exercida no condutor aquando de um curto-circuito. Este ângulo é calculado com recurso à expressão Eq.5.3 e deverá estar em graus.

$$\boldsymbol{\delta_1 = \tanh^{-1}(r) \approx 72,424^{\circ}} \qquad \text{Eq.5. 3}$$

Posteriormente é necessário calcular a flexa estática equivalente do condutor a meio do vão, que resulta da passagem da corrente de curto-circuito. Esta flexa será calculada em função da força de tração estática exercida no condutor, para uma temperatura mínima de inverno (-20ºC, segundo o catálogo do cabo usado), e também de acordo com a força de tração estática existente na temperatura máxima de operação de 60 ° C. Deste modo teremos duas flexas, uma para cada temperatura, de acordo com as seguintes expressões que deverão estar em metros.

$$\mathbf{f_{es(-20º)}} = \frac{\mathbf{n \times m'_{s} \times g \times l^2}}{\mathbf{8 \times F_{st20}}} \approx \mathbf{0,280\ m} \qquad \text{Eq.5. 4}$$

$$\mathbf{f_{es(60º)}} = \frac{\mathbf{n \times m'_{s} \times g \times l^2}}{\mathbf{8 \times F_{st60}}} \approx \mathbf{0,360\ m} \qquad \text{Eq. 5. 5}$$

Com os valores de $f_{es(60º)}$ e $f_{es(-20º)}$, será calculado o período de oscilação do condutor. Este período deverá ser apresentado em segundos, e calculado com recurso às expressões matemáticas que se seguem, para as duas temperaturas.

$$\mathbf{T_{-20^{\circ}} = 2\pi \times \sqrt{\frac{0,8 \times f_{es(-20º)}}{g}} \approx 0.280\ s} \qquad \text{Eq.5. 6}$$

$$\mathbf{T_{60^{\circ}} = 2\pi \times \sqrt{\frac{0,8 \times f_{es(60º)}}{g}} \approx 0.359\ s} \qquad \text{Eq.5. 7}$$

Durante a passagem da corrente de curto-circuito o condutor oscila a um determinado período, para cada temperatura de funcionamento. Assim o período resultante da oscilação de um condutor durante a passagem de um curto-circuito é dado pelas expressões Eq.5.8 e Eq.5.9, e deverá ser apresentado em segundos.

$$\mathbf{T_{res(-20^{\circ})}} = \frac{\mathbf{T}}{\sqrt[4]{\mathbf{1+r^2}} \times [\mathbf{1 - \frac{\pi^2}{64} \times \left(\frac{\delta_1}{90^{\circ}}\right)^2}]} = \mathbf{0.171\ s} \qquad \text{Eq.5. 8}$$

$$\mathbf{T_{res(60^{\circ})}} = \frac{\mathbf{T}}{\sqrt[4]{\mathbf{1+r^2}} \times [\mathbf{1 - \frac{\pi^2}{64} \times \left(\frac{\delta_1}{90^{\circ}}\right)^2}]} = \mathbf{0.219\ s} \qquad \text{Eq.5. 9}$$

Seguidamente é necessário calcular a norma de rigidez do cabo. Para este cálculo é necessário conhecer a constante de elasticidade resultante dos dois suportes de um vão (S), tal como o módulo de Young atual (E_{eff}). No caso em estudo, como o valor de S não é conhecido, assume-se um valor pré-definido consoante o nível de tensão. Neste caso, estando a analisar o andar de 60kV, assume-se que $S = 100 \times 10^3$ N/m.

Para o cálculo da norma de rigidez, é necessário determinar o módulo de Young atual, avaliando primeiramente a seguinte condição:

$$\boldsymbol{\frac{F_{st}}{n \times A_s} \leq \sigma_{fin},} \qquad \text{Eq.5. 10}$$

Onde $\sigma_{fin} = 50 \times 10^6\ N/m^2$

Como a condição Eq.5.10 é verdadeira, o valor de E_{eff}é calculado segundo as expressões Eq.5.11 e Eq.5.12 e deverá ser apresentada em N/m^2.

$$E_{eff(-20°)} = E \times \left[1 - \cos\left(360^\circ \frac{T_k}{T_{res(-20)}}\right)\right] = 1.801\ \left(\frac{N}{m^2}\right) \quad \text{Eq.5. 11}$$

$$E_{eff(60°)} = E \times \left[1 - \cos\left(360^\circ \frac{T_k}{T_{res(60)}}\right)\right] = 1.779\ \left(\frac{N}{m^2}\right) \quad \text{Eq.5. 12}$$

Com estes cálculos preliminares realizados em Eq.5.10, Eq.5.11 e Eq.5.12, poderá agora ser calculada a norma de rigidez do cabo, recorrendo às seguintes expressões Eq.5.13 e Eq.5.14, que deverão ser apresentadas na unidade indicada.

$$N_{-20°} = \frac{1}{S \times l} + \frac{1}{n \times E_{eff(-20°)} \times A_s} = 5,631 \times 10^{-6}\ \left(\frac{1}{N}\right) \quad \text{Eq.5. 13}$$

$$N_{60°} = \frac{1}{S \times l} + \frac{1}{n \times E_{eff(60°)} \times A_s} = 5,632 \times 10^{-6}\ \left(\frac{1}{N}\right) \quad \text{Eq.5. 14}$$

Como a passagem da corrente de curto-circuito, cria uma tensão no condutor, é importante determinar o fator de tensão no cabo, que depende da norma de rigidez calculada anteriormente. Para o seu cálculo recorre-se às seguintes expressões, cujo resultado é adimensional.

$$\varepsilon_{-20°} = \frac{(n \times g \times m_s' \times l)^2}{24 \times F_{st}^3 \times N} = 0,261 \quad \text{Eq.5.15}$$

3

$$\varepsilon_{-60°} = \frac{(n \times g \times m_s' \times l)^2}{24 \times F_{st}^3 \times N} = 1,174 \quad \text{Eq.5. 16}$$

De seguida deverá ser calculado o ângulo de oscilação do condutor no final da passagem da corrente de curto-circuito. Este cálculo depende da relação entre o tempo de passagem da corrente de curto-circuito e o período resultante da oscilação de um condutor durante a passagem da corrente de um curto-circuito.

A expressão para o cálculo de δ_{end}, para o caso em estudo é dada pelas expressões Eq.5.17 e Eq.5.18, onde o resultado deverá ser apresentado em graus.

$$\delta_{end(-20°)} = \delta_1 \times 2 = 144,850^\circ \text{, com } \frac{T_k}{T_{res}} > 0,5 \quad \text{Eq.5. 17}$$

$$\delta_{end(60°)} = \delta_1 \times 2 = 144,850^\circ\text{, com } \frac{T_k}{T_{res}} > 0,5 \quad \text{Eq.5. 18}$$

Para além de existir um ângulo de oscilação no final da passagem da corrente de curto-circuito, como o condutor não apresenta derivações a meio do vão, então existirá um ângulo

máximo de oscilação do condutor (δ_{max}). Este ângulo máximo é obtido em função de δ_{end}, pois o valor deste determinará o valor do fator χ e consequentemente a expressão de cálculo de δ_{max}.

Deste modo, sabendo que $\delta_{end} > 90°$ (para ambas as temperaturas), tem-se que, $\chi = (1 - r)$, e com $\chi < -2.157$, o cálculo do ângulo de oscilação máximo é dado pela expressão 5.19, que deverá ser apresentada em graus.

$$\boldsymbol{\delta}_{\mathbf{max(-20°)}} = \boldsymbol{\delta}_{\mathbf{max(60°)}} = \mathbf{180,0°} \qquad \text{Eq.5. 19}$$

Devido à passagem de corrente de curto-circuito pelo condutor será criada uma força de tensão sobre o cabo em análise, designada por: força de tensão durante o curto-circuito no condutor central principal ($F_{t,d}$). Esta força deverá ser dada em kN e calculada de acordo com as expressões Eq.5.20 e Eq.5.21 em função dos fatores de cálculo φ e ψ, sendo estes fatores adimensionais.

$$\mathbf{F_{t,d(-20°)} = F_{st(-20°)} \times (1 + \varphi\psi) = 0,929\ kN} \qquad \text{Eq.5. 20}$$

$$\mathbf{F_{t,d(60°)} = F_{st(60°)} \times (1 + \varphi\psi) = 0,828\ kN} \qquad \text{Eq. 5. 21}$$

Para obter o valor do fator de cálculo φ deve-se primeiramente verificar a seguinte relação, tanto para a temperatura de -20ºC e 60ºC : $T_k > \frac{T_{res}}{4}$. Como para o presente caso em análise a relação verifica-se então φ é calculada pela expressão matemática Eq.5.22.

$$\mathbf{\varphi_{-20} = \varphi_{60} = 3\left(\sqrt{1 + r^2} - 1\right) = 6,943} \qquad \text{Eq. 5. 22}$$

Relativamente fator ψ , este é dado em função de ξ e φ, como solução da equação 5.23 ou pela figura 5.1. Para o cálculo automático recorre-se à expressão Eq.5.23 que é resolvida de forma iterativa. Contudo para o cálculo manual recorrer-se-á à figura 5.1 que fornece um valor aproximado mas obtido de forma rápida, onde $\psi_{-20} \approx 0{,}25$ e $\psi_{60} \approx 0{,}40$.

$$\boldsymbol{\varphi^2\psi^3 + \varphi(2 + \xi)\psi^2 + (1 + 2\xi)\psi - \xi(2 + \varphi) = 0}\ , \qquad \text{Eq.5. 23}$$

Com $0 < \psi \leq 1$.
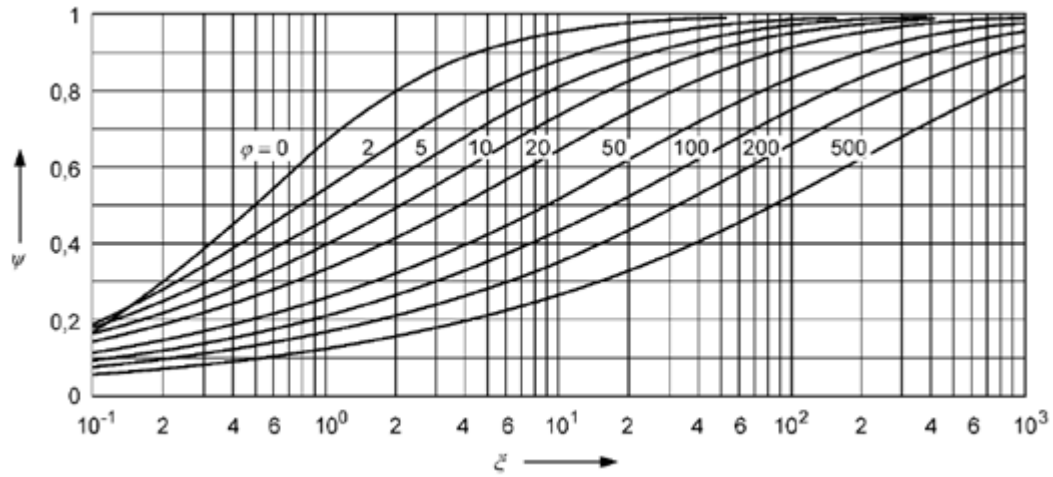
Figura 5.1- Fator ψ de força de tensão nos condutores **[7]**

Como após a passagem da corrente de curto-circuito o cabo continua a oscilar, cai, ou estão estabiliza para uma posição final. Deverá então ser calculada a força aplicada ao condutor principal após a passagem da corrente de curto-circuito- $F_{f,d}$ - apenas quando $r >$ $0{,}6$ e $\delta\max \geq 70°$, para cabos sem derivações. Esta força é calculada segundo as expressões Eq.5.24 e Eq.5.25, onde deverão ser apresentadas em kN.

$$F_{f,d(20°)} = 1{,}2 \times F_{st(20°)} \times \sqrt{1 + 8\varepsilon_{t-20°} \times \frac{\delta_{max(20°)}}{180°}} = 0{,}774\ kN \qquad \text{Eq.5. 24}$$

$$F_{f,d(60°)} = 1{,}2 \times F_{st(60°)} \times \sqrt{1 + 8\varepsilon_{t-60°} \times \frac{\delta_{max(60°)}}{180°}} = 0.732\ kN \qquad \text{Eq.5. 25}$$

Seguidamente, como resultado da passagem da corrente de curto-circuito, será necessário calcular o alongamento elástico no cabo causado pela corrente de curto-circuito. Este cálculo deverá ser feito através da expressão Eq.5.26, apenas para a temperatura de 60ºC, pois com esta temperatura obtém-se uma maior dilatação do condutor, quando comparada com uma temperatura de -20°C.

$$\varepsilon_{ela} = N\left(F_{t,d(60°)} - F_{st(60°)}\right) = 0.004 \qquad \text{Eq.5. 26}$$

Para além do alongamento elástico do material, existe também uma dilatação térmica no mesmo. Contudo para o seu cálculo é necessário primeiramente verificar a relação entre T_k e $T_{res}/4$, que consoante o seu valor assim determinará a expressão de cálculo para a dilatação térmica. Como como $T_k > T_{res}/4$ resulta a seguinte expressão para o cálculo de ε_{th} (onde $c_{th} = 2.70 \times 10^{-19} m^4/A^2 s$ pois o condutor é de alumínio).

$$\varepsilon_{th} = c_{th}\left(\frac{I_{cc}}{n \times A_s}\right)^2 \times T_{res(60°)} = 1.725 \times 10^{-5} \qquad \text{Eq.5. 27}$$

Os valores de ε_{th} e ε_{ela} são adimensionais e serão usados para o cálculo do fator de dilatação. Este fator considera os aumentos da flecha resultantes do alongamento elástico e

da dilatação térmica do condutor. O fator de dilatação é dado pela expressão Eq.5.28 e deverá ser calculado apenas para uma temperatura de 60ºC.

$$\mathbf{C_D} = \sqrt{\mathbf{1} + \frac{3\left[\frac{1}{\mathrm{fes(60°)}}\right]^2 \times (\varepsilon_{ela}+\varepsilon_{th})}{8}} = \mathbf{1,920} \qquad \text{Eq.5. 28}$$

Seguidamente deverá ser calculado o fator de forma, que considera um possível aumento da flecha do condutor causado por uma alteração da forma da curva do condutor. Este fator é adimensional e dado em função do rácio da força eletromagnética, que consequentemente definirá a expressão de calculo de C_F. Para a situação em análise, como o valor de r é superior a 1,8 então o fator de forma será igual a 1,15.

Com os valores do fator de forma e de dilatação é possível obter o máximo deslocamento horizontal de um cabo, b_h, aquando do curto-circuito. Este deslocamento depende do valor do ângulo máximo, e pelo fato de o condutor ser tracionado ou suspenso. O cálculo do deslocamento deverá apenas ser feito para a temperatura de 60ºC, pois obtêm-se maiores valores de b_h.

Uma vez que o condutor é suspenso, $l_c = l$, e como $\delta_{max(60°)} > 90°$, tem-se que o deslocamento máximo é dado pela expressão Eq.5.29, em metros.

$$\mathbf{b_h} = \mathbf{C_D} \times \mathbf{C_F} \times \mathbf{f_{es(60)}} = \mathbf{0.089\ m} \qquad \text{Eq.5. 29}$$

Durante o curto-circuito, os condutores em configuração complanar, são deslocados a meio do vão. No caso mais desfavorável, sobre um círculo de raio b_h à volta da linha reta que une os dois pontos de fixação adjacentes. A distância entre pontos centrais dos dois condutores principais durante um curto-circuito é dada, no caso mais desfavorável pela expressão Eq.5.30.

$$\boldsymbol{a_{min}} = \boldsymbol{a} - \mathbf{2}\boldsymbol{b_h} = \mathbf{1.323\ m} \qquad \text{Eq.5. 30}$$

Como não existem elementos espaçadores entre os subcondutores, então não será necessária calcular a força de aperto entre os subcondutores. Portanto haverá apenas duas forças para comparar com a força que os suportes aguentam: o máximo da força aplicada no início do curto-circuito e o máximo da força aplicada no condutor no final co curto-circuito, neste caso termos: $F_{f,d(20°)}$, $F_{t,d(-20°)}$.De referir também que para que o cabo flexível resista aos esforços mecânicos, deverá suportar as forças $F_{f,d(20°)}$, e $F_{t,d(-20°)}$.

Com os cálculos efetuados, conclui-se que uma vez que os suportes das extremidades suportam aos esforços dinâmicos dos curto-circuitos, uma força de 4kN, e como as forças aqui calculadas são inferiores a 4kN então os suportes resistem aos esforços mecânicos causados pela corrente de curto-circuito analisada.

Conclui-se também que, como a_{min} é positivo e diferente de zero, então os condutores durante a sua oscilação, como resultado da passagem da corrente de curto-circuito, não colidem.

- Barramento AT

Seguidamente será efetuada a análise do barramento AT, que se encontra entre os seccionadores. O barramento é constituído por três condutores rígidos tubulares (um condutor por fase) de alumínio, onde as suas características encontram-se descritas nas tabelas 5.5, 5.6 e 5.7.

Tabela 5.5- Características do cabo rígido tubular

Tipo de condutor	Material	Massa Especifíca m'_m (kg/m)	Dimensões do condutor (mm)	Secção (mm^2)	Módulo de Young (N/mm^2)	f_y
Condutor Tubular	Alumínio	1,67875	80/70	1180	70360,4187	215

Tabela 5.6- Características do cabo rígido tubular (continuação)

Resistência do Condutor (Ω/km)	Reatância do condutor (Ω/km)
0,0241	0,336

Tabela 5.7 -Configuração e distâncias no barramento AT

Comprimento do Tubo (m)	Número de subcondutores	Espaçamento entre condutores (m)
6	1	1,5

Para o estudo do barramento AT serão utilizadas as características da corrente de curto-circuito descritas na secção 5.1. Esta corrente de curto-circuito sendo trifásico, a força no condutor central será calculada de acordo com a expressão em Eq.5.32. Contudo, esta força está dependente da corrente de pico e da distância efetiva entre condutores, onde deverá ser primeiramente calculado estas duas últimas variáveis.

A corrente de pico deverá ser calculada com recurso à expressão 5.31, e deverá ser apresentada em kA. Quanto à distância efetiva entre condutores, uma vez que os condutores têm uma secção circular, então $a_m = a$.

$$\mathbf{i_p} = \sqrt{\mathbf{2}} \times \mathbf{k} \times \mathbf{I_{cc}} = \mathbf{64{,}002\ kA}\ , \qquad \text{Eq.5. 31}$$

Onde $k = 1{,}02 + 0{,}98^{\frac{-3R}{X}}$.

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times i_p^2 \frac{l}{a_m} = 2{,}838\ \mathrm{kN} \qquad \text{Eq.5.32}$$

Seguidamente é preciso avaliar se existe perigo de efeito de ressonância, pois os condutores estão sujeitos a oscilações e vibrações, que podem aumentar consideravelmente quando ocorre um curto-circuito. Assim, é necessário calcular a frequência própria do condutor - f_{cm} . Esta frequência pode ser obtida recorrendo à expressão Eq.5.33, que deverá ser apresentada em Hz. Para o cálculo desta frequência, deverá ser determinado o valor do fator γ e o momento de inércia do condutor. O fator γ depende do tipo e do número de suportes, e para o caso em análise toma o valor de 2,45 (pois existe um único vão fixo nas extremidades). Quanto à determinação do momento de inércia, este depende do tipo de

condutor e da sua configuração, assim nesta situação deverá recorrer-se à expressão Eq.5.34 para o seu cálculo.

$$\mathbf{f_{cm}} = \frac{\gamma}{l^2} \times \sqrt{\frac{E \times J_m}{m'_m}} = \mathbf{16.334\ Hz} \qquad \text{Eq.5. 33}$$

$$\mathbf{J_m} = \frac{\pi}{64} \times (\mathbf{c_s} - (\mathbf{c_s} - \mathbf{2s})^4) = \mathbf{1.374 \times 10^{-6}\ m^4} \qquad \text{Eq.5. 34}$$

Depois de calculada a f_{cm} é necessário analisar se existe perigo de efeito de ressonância. Deste modo o valor de f_{cm} deve estar suficientemente afastado do valor da frequência elétrica da rede e dos seus múltiplos. Sendo assim os valores a evitar estarão no intervalo: $[f - 0{,}1f;\ f + 0{,}1f] \cup [2f - 0{,}1 \times 2f;\ 2f + 0{,}1 \times 2f]$. [29] Como a frequência do condutor não se encontra no intervalo estipulado, conclui-se que para o caso do barramento em análise, não existe perigo de ocorrer frequências de ressonância.

Posteriormente é necessário calcular a força de flexão nos condutores principais. Para isso, terá de se obter os fatores: $V_F, V_{\sigma m}, V_{rm}$, através da figura 5.2, e sabendo que $f_{cm}/f \approx 0{,}33$ e que $k > 1{,}6$. Assim, através da consulta gráfica obtêm-se os seguintes valores adimensionais

$$V_F \approx 0.90\ ;\ V_{\sigma m} \approx 0{,}90;\ V_{rm} \approx 1.0$$
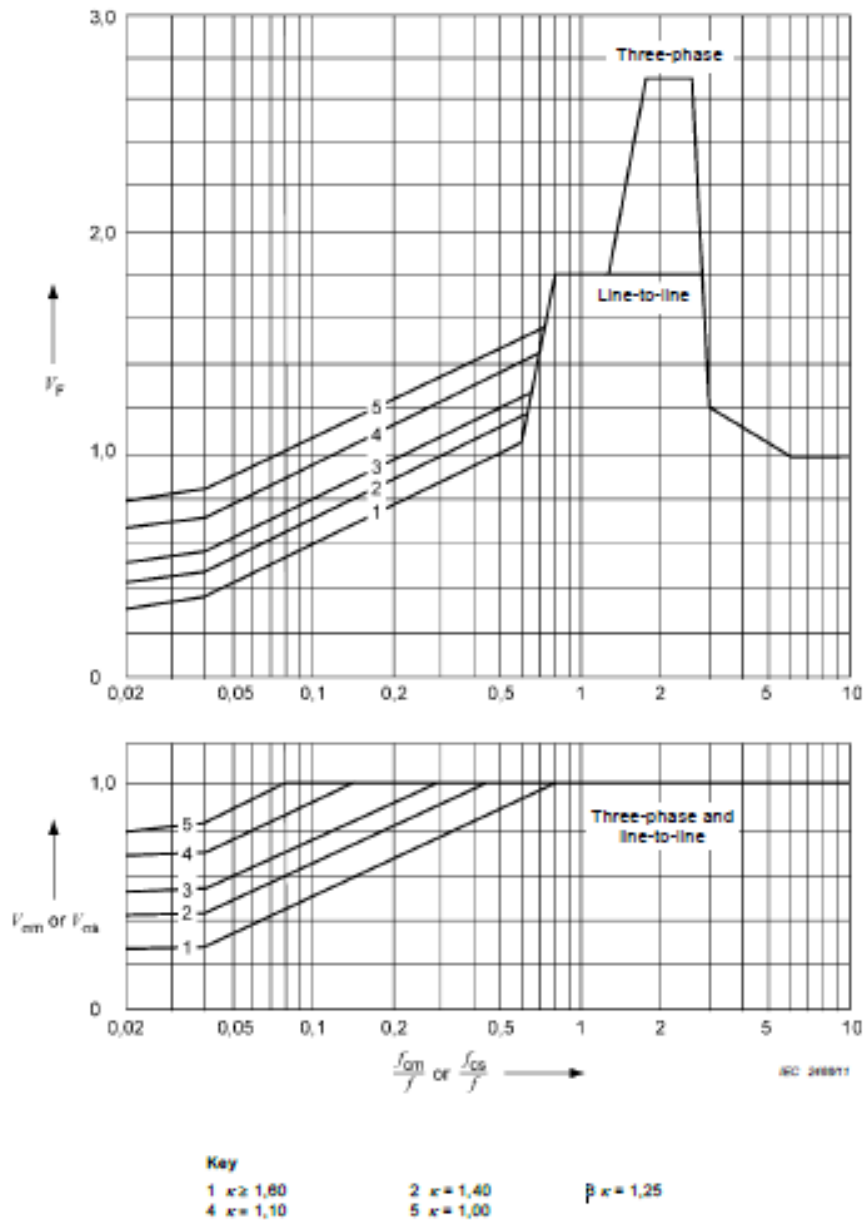
Figura 5.2- Fatores de cálculo [9]

Seguidamente para ser possível calcular a força de tensão entre os condutores, terá de ser calculado o módulo de secção do condutor, que sendo este tubular assume a expressão Eq.5.35, tal como obter o fator β, que depende do tipo de suporte e configuração do barramento. Neste caso o fator $\beta = 0{,}73$, pelo fato de existir um único vão e este se encontrar fixo numa das extremidades e com outro suporte deslizante na extremidade oposta.

$$W_m = \frac{2\times Jm}{c_s} = 3.436 \times 10^{-5}\ \mathrm{m}^3 \qquad \text{Eq.5.35}$$

$$\sigma_{tot} = \sigma_{m,d} = V_{\sigma m} \times V_{rm} \times \beta \times \frac{F_{m3}\times l}{8W_m} = 3.613 \times 10^{7} \left(\frac{N}{m^2}\right) \qquad \text{Eq.5. 36}$$

Depois de conhecido o valor de σ_{tot} , é preciso verificar se o condutor resiste aos esforços mecânicos resultantes da corrente de curto-circuito, onde para isso é necessário que a condição Eq.5.38 seja verdadeira. Esta condição está dependente do fator q, que por conseguinte depende da forma da secção do condutor, e sendo este tubular deverá recorrer-se à expressão Eq.5.37.

$$q = 1,7 \times \frac{1-(1-\frac{2s}{c_S})^3}{1-(1-\frac{2s}{c_S})^4} = 1.437 \qquad \text{Eq.5. 37}$$

$$\sigma_{tot} \leq q \times f_y \qquad \text{Eq.5. 38}$$

Como $261{,}3\,(N/mm^2) < 301(N/mm^2)$ então, o condutor tubular em análise resiste aos esforços mecânicos. Contudo, para além das forças que são exercidas sobre os condutores, também existem forças exercidas sobre os suportes. As forças exercidas sobre os suportes podem ser calculadas com recurso às expressões e Eq.5.39 e Eq.5.40, onde haverá duas forças: uma exercida no suporte A ($F_{rd,A}$) e outra no suporte B ($F_{rd,B}$). Para isso terá de ser primeiramente determinado o valor do fator α, que depende do tipo de suporte e do número de vãos. Como neste caso, o suporte encontram-se fixo numa das extremidades e existe um único vão, então: $\alpha_A = 0{,}625$ e $\alpha_B = 0{,}375$.

$$F_{rd,A} = V_F \times V_{rm} \times \alpha \times F_{m3} = 1.585\ kN \qquad \text{Eq.5. 39}$$

$$F_{rd,B} = V_F \times V_{rm} \times \alpha \times F_{m3} = 0.951\ kN \qquad \text{Eq.5. 40}$$

Depois calculadas as forças exercidas sobre os suportes, é necessário averiguar se estas são superiores às forças que os suportes aguentam. Como os suportes resistem a esforços de 12,5kN, então estes resistem à corrente de curto-circuito de 25kA, e portanto, estão bem dimensionados para os esforços em questão.

- Barramento MT

Como o *software* encontra-se projetado para o dimensionamento de condutores rígidos em forma de barras, será efetuado um cálculo dos esforços mecânicos resultantes da corrente de curto-circuito, sem recurso ao Seedu. Para tal, recorreu-se a um projeto de uma subestação clássica em que o barramento MT (com uma tensão de 15kV) possui as características da tabela 5.8 e 5.9, tendo em conta as características da corrente de curto-circuito da tabela 5.10.

Tabela 5.8 -Características do barramento MT

Material	Massa Especifíca m'_m (kg/m)	A_S (mm^2)	Dimensões do condutor (mm)	Massa Especifíca (kg/m)	$f_{y(\min)}$	Resistência do Condutor (Ω/km)	Reatância do condutor (Ω/km)
Cobre	1,62	800	80/10	70000	120	0,114	0,316

Tabela 5.9- Configuração e distâncias no barramento MT

Distância entre suportes (m)	Número de subcondutores	Espaçamento entre condutores (m)
1,5	1	0,28

Tabela 5.10-Características da corrente de curto-circuito no barramento MT

Tipo de curto-circuito	I_{cc} (KA)	I_{k3} (kA)	T_k (s)
Trifásico	16	11,2	3

Inicialmente calcular-se-á a força exercida no condutor central resultante do curto-circuito trifásico. Sabendo que não existem subcondutores a expressão da força é dada pela expressão Eq.5.41:

$$\boldsymbol{F_{m3}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times \mathbf{i_p^2} \frac{\mathbf{l}}{\mathbf{a_m}} = \mathbf{857.179\ N}, \qquad \text{Eq.5.41}$$

Onde $a_m = a/K_{12} = 0.305$, pois trata-se de um condutor retangular, e $i_p = \sqrt{2} \times k \times I_{cc} = 30.547\ kA$.

Seguidamente é necessário verificar se existe a possibilidade de ocorrerem frequências de ressonância, através da expressão matemática Eq.5.42.

$$\mathbf{f_{cm}} = \frac{\gamma}{l^2} \times \sqrt{\frac{E \times J_m}{m'_m}} = \mathbf{18,481\ Hz}, \qquad \text{Eq.5.42}$$

Onde, $\gamma = 3{,}56$, pois o barramento está fixo em ambas as extremidades.

Quanto à determinação do momento de inércia, este depende do tipo de condutor e da sua configuração, assim nesta situação deverá recorrer-se à expressão Eq.5.43 para o seu cálculo.

$$\mathbf{J_m} = \frac{b_s c_s{}^3}{12} = \mathbf{6.667 \times 10^{-9}\ m^4} \qquad \text{Eq.5.43}$$

Como $f_{cm} \notin: [f - 0{,}1f;\ f + 0{,}1f] \cup [2f - 0{,}1 \times 2f;\ 2f + 0{,}1 \times 2f]$ pode concluir-se que não há perigo de efeito de ressonância.

Posteriormente é necessário obter os fatores: $V_F, V_{\sigma m}$, V_{rm} através dos gráficos da figura 5.1, e sabendo que $f_{cm}/f = 0{,}534$ e que $k > 1{,}6$. Estes fatores são indispensáveis para os cálculos que se seguem. Assim, consultando a figura 5.2 obtêm-se os seguintes valores:

$$V_F \approx 4\ ;\ V_{\sigma m} \approx 1.0;\ V_{rm} \approx 1.0$$

Para o cálculo da força de tensão no condutor, é preciso primeiramente obter o valor de W_m segundo a expressão Eq.5.44, tal como do fator β. Sabendo que os suportes encontram-se fixos nas extremidades $\beta = 0{,}5$.

$$\boldsymbol{W_m} = \frac{2\times Jm}{c_s} \approx \mathbf{1,666\times10^{-6}\ m^3} \qquad \text{Eq.5.44}$$

$$\boldsymbol{\sigma_{tot}} = \boldsymbol{\sigma_m} = \mathbf{V_{\sigma m}} \times \mathbf{V_{rm}} \times \boldsymbol{\beta} \times \frac{F_{m3}\times \mathbf{l}}{\mathbf{8W_m}} = \mathbf{8,799\times10^7}(\frac{\mathbf{N}}{\mathbf{m^2}}) \qquad \text{Eq.5.45}$$

Para que o condutor resista aos esforços mecânicos resultantes da corrente de curto-circuito, é preciso que se verifique a condição Eq.5.46. O fator q toma o valor de 1,5 pelo fato de o condutor ter o formato de uma barra retangular.

$$\boldsymbol{\sigma_{tot}} \leq \mathbf{q} \times \mathbf{f_y} \qquad \text{Eq.5.46}$$

Como $6{,}027\ (\mathrm{N/mm^2}) < 180\ (\mathrm{N/mm^2})$ então o condutor em análise resiste aos esforços mecânicos.

Seguidamente á necessário calcular a força exercida sobre os dois suportes, através das expressões seguintes. Sabendo que $\alpha_A = 0{,}625$ e $\alpha_B = 0{,}375$, pois existe um suporte fixo e na extremidade oposta um deslizante.

$$\mathbf{F_{rd,A}} = \mathbf{V_F} \times \mathbf{V_{rm}} \times \boldsymbol{\alpha_a} \times \boldsymbol{F_{m3}} = \mathbf{2,196\ kN} \qquad \text{Eq.5.47}$$

$$\mathbf{F_{rd,B}} = \mathbf{V_F} \times \mathbf{V_{rm}} \times \boldsymbol{\alpha_b} \times \boldsymbol{F_{m3}} = \mathbf{1,318\ kN} \qquad \text{Eq.5.48}$$

A partir do resultado obtido pode-se concluir que os suportes resistem aos esforços dinâmicos, pois as forças aplicadas nos suportes é inferior a 4kV (valor máximo da força que pode ser aplicada ao suporte em análise).

5.1.2 - Cálculo dos esforços térmicos

Os cálculos relativos aos esforços térmicos, tal como nos esforços mecânicos, também devem ser realizados para cada troço da subestação a analisar. Os resultados destes cálculos têm apenas em consideração que existe um condutor por fase.

- Cabo flexível entre a linha AT e o TI

Inicialmente deve-se calcular a corrente térmica equivalente (r.m.s) de acordo com a expressão Eq.5.53. Para isso, precisa-se de se obter os fatores m e n. O fator m está relacionado com o tempo da componente dc da corrente de curto-circuito, e deve ser calculado pela expressão Eq.5.49. O fator n está relacionado com a componente ac da corrente e é dado pela expressão Eq.5.50.

$$\boldsymbol{m} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}\times f\times T_k\times \ln(k-1)} \times \left[e^{4\times f\times T_k\times \ln(k-1)} - \mathbf{1}\right] = \mathbf{0.002} \qquad \text{Eq.5.49}$$

$$\mathbf{n} = \frac{1}{(\mathbf{I_{cc}}/\mathbf{I_k})^2} \times \left[\mathbf{1} + \frac{\mathbf{T'_d}}{\mathbf{20T_k}} \times \left(\mathbf{1} - \mathbf{e}^{-20\times\frac{\mathbf{T'_d}}{\mathbf{T_k}}} \right) \times \left(\frac{\mathbf{I_{cc}}}{\mathbf{I_k}} - \frac{\mathbf{I'_k}}{\mathbf{I_k}} \right)^2 + \frac{\mathbf{T'_d}}{\mathbf{2T_k}} \times \left(\mathbf{1} - \mathbf{e}^{-20\times\frac{\mathbf{T_k}}{\mathbf{T'_d}}} \right) \times \left(\frac{\mathbf{I'_k}}{\mathbf{I_k}} - \mathbf{1} \right)^2 + \frac{\mathbf{T'_d}}{\mathbf{5T_k}} \times \left(\frac{\mathbf{I_{cc}}}{\mathbf{I_k}} - \frac{\mathbf{I'_k}}{\mathbf{I_k}} \right) + \frac{\mathbf{2T'_d}}{\mathbf{T_k}} \times \left(\mathbf{1} - \mathbf{e}^{-\frac{\mathbf{T_k}}{\mathbf{T'_d}}} \right) \times \left(\frac{\mathbf{I'_k}}{\mathbf{I_k}} - \mathbf{1} \right) + \frac{\mathbf{T'_d}}{\mathbf{5{,}051T_k}} \times \left(\mathbf{1} - \mathbf{e}^{-10{,}1\times\frac{\mathbf{T_k}}{\mathbf{T'_d}}} \right) \times \left(\frac{\mathbf{I_{cc}}}{\mathbf{I_k}} - \frac{\mathbf{I'_k}}{\mathbf{I_k}} \right) \right] \times \left(\frac{\mathbf{I'_k}}{\mathbf{I_k}} - \mathbf{1} \right) = \mathbf{0.741}$$

Eq.5.50

Para o cálculo do valor de n, é necessário determinar o valor da constante de tempo transitória que é dada pela expressão Eq.5.51 e a corrente de curto-circuito transitória dada pela expressão Eq.5.52.

$$\mathbf{T'_d} = \frac{\mathbf{3{,}1}}{(\mathbf{I'_k}/\mathbf{I_k})} = \mathbf{2.622} \qquad \text{Eq.5.51}$$

$$\mathbf{I'_k} = \frac{\mathbf{I_{cc}}}{\mathbf{0{,}88\times0{,}17\times(\,I_{cc}/I_k)}} = \mathbf{22.699\ kA} \qquad \text{Eq.5.52}$$

Com os cálculos preliminares realizados, pode-se agora determinar o valor da corrente térmica equivalente, através da expressão matemática 5.53, onde deverá ser expressa em kA.

$$\mathbf{I_{th}} = \mathbf{I_{cc}} \times \sqrt{\mathbf{m} + \mathbf{n}} = \mathbf{21{,}542\ kA} \qquad \text{Eq.5.53}$$

Seguidamente deverá ser calculado o valor da densidade da corrente de curto-circuito térmica equivalente, que é dada por:

$$\mathbf{S_{th}} = \frac{\mathbf{I_{th}}}{\mathbf{A_s}} = \mathbf{58{,}903\ A}/\boldsymbol{mm}^2 \qquad \text{Eq.5.54}$$

Com o valor de $\mathrm{S_{th}}$ deverá ser calculada a densidade de corrente convencional de curta duração estipulada (valor eficaz), durante um segundo (T_{kr}=1),recorrendo à expressão Eq.5.55. Para tal, é essencial determinar os fatores de cálculo seguintes:

Tabela 5.11- Fatores de cálculo para a S_{thr} para condutor de alumínio

α_{20}	K_{20}	c	ρ
0,004	$34{,}8 \times 10^6$	910	2700

$$\boldsymbol{S_{thr}} = \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\boldsymbol{T_{kr}}}} \times \sqrt{\frac{\boldsymbol{K_{20}\times c\times\rho}}{\boldsymbol{\alpha_{20}}} \times \mathbf{ln}\left(\frac{\mathbf{1}+\boldsymbol{\alpha_{20}}\times(\boldsymbol{\vartheta_e}-\mathbf{20°})}{\mathbf{1}+\boldsymbol{\alpha_{20}}\times(\boldsymbol{\vartheta_b}-\mathbf{20°})}\right)} = \mathbf{83.884\ A/mm^2} \qquad \text{Eq.5.55}$$

Para que o cabo resista aos efeitos térmicos é necessário que se verifique a seguinte condição:

$$\mathrm{S_{th}} \leq \mathrm{S_{thr}} \times \sqrt{\frac{\mathrm{T_{kr}}}{\mathrm{T_k}}} \qquad \text{Eq.5.56}$$

Com $S_{thr} \times \sqrt{T_{kr}/T_k} = 48{,}430\ \mathrm{A}/mm^2$, que é menor que o S_{th}, pode-se concluir que o condutor em análise não resistirá aos esforços térmicos a que se encontra sujeito durante um curto-circuito. Contudo, deverá ser tido em atendido que os cálculos efetuados não consideram que a existência de subcondutores, para efeitos de distribuição de corrente. Ou seja os cálculos refletem que a corrente flui apenas por um subcondutor com a secção de $366{,}22\ \mathrm{mm}^2$.

- Barramento AT

Tal como efetuado para o cálculo dos efeitos térmicos nos cabos, também para o condutor tubular, deverá ser calculada a corrente de curto-circuito térmica equivalente (r.m.s), com a expressão Eq.5.57 e sabendo os fatores m e n, calculados segundo as expressões Eq.5.49 e Eq.5.50.

$$\mathbf{I_{th} = I_{cc} \times \sqrt{m + n} = 21.742\ kA} \qquad \text{Eq.5. 57}$$

Os fatores $\mathrm{T'_d}$ e $\mathrm{I'_k}$ necessários para o cálculo de m e n são calculados segundo as expressões matemáticas enumeradas em Eq.5.51 e Eq.5.52. Os resultados de cálculo dos fatores necessários para o cálculo de $\mathrm{I_{th}}$ encontram-se na tabela 5.12.

Tabela 5.12 -Fatores de cálculo para a $\mathbf{I_{th}}$

m	I'_k (kA)	T'_d	n
0,016	22,699	2,622	0,741

De seguida, tal como nos cálculos dos efeitos térmicos nos cabos, terá que ser calculada a densidade da corrente de curto-circuito térmica equivalente, que é a mesma expressão utilizada para os cabos e enumerada em Eq.5.58.

$$\mathbf{S_{th} = \frac{I_{th}}{A_s} = 18.426\ \ A/mm^2} \qquad \text{Eq.5.58}$$

Em seguida deverá ser calculada a densidade de corrente convencional de curta duração estipulada (valor eficaz), durante um segundo ($\mathrm{T_{kr}}$=1), recorrendo à expressão Eq.5.55, e tendo em conta os fatores de cálculo expressos pela tabela 5.11 (pois o tubo é de alumínio).Assim resulta um valor de $S_{thr} = 83{,}884\ \mathrm{A/mm^2}$. Posteriormente é necessário verificar a condição Eq.5.59, que determina se o condutor resistirá aos esforços térmicos.

$$\mathbf{S_{th} \leq\ S_{thr} \times \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}}} \qquad \text{Eq.5.59}$$

Sabendo que $\mathrm{S_{th}} = 18.426\ \mathrm{A/mm^2}$ e que $S_{thr} \times \sqrt{T_{kr}/T_k} = 48{,}431\ A/mm^2$, pode-se concluir que o condutor em análise resistirá aos esforços térmicos de uma corrente de curto-circuito com as características descritas na tabela 5.1.

- Barramento MT

Para os esforços térmicos em condutores rígidos em forma de barra, segue-se a mesma “linha” de cálculo dos condutores tubulares e cabos flexíveis. Assim, calcular-se-á

primeiramente a corrente de curto-circuito térmica equivalente (r.m.s), cuja expressão é igual à utilizada para os tubos e para as barras. O fatores de cálculo para a I_{th} são obtidos recorrendo às expressões Eq.5.49, Eq.5.50,Eq.5.51 e Eq.5.52. cujo resultado está apresentado na tabela 5.13.

Tabela 5.13- Fatores de cálculo para a I_{th}

m	I_k' (KA)	T_d'	n
0.003	14.249	2.437	0.673

Assim a corrente de curto-circuito térmica equivalente (r.m.s) assume o valor de $13.159\ \mathrm{kA}$, de acordo com a expressão Eq.5.60.

$$\mathbf{I_{th}} = \mathbf{I_{cc}} \times \sqrt{\mathbf{m} + \mathbf{n}} = \mathbf{13.159\ kA} \qquad \text{Eq.5. 60}$$

Seguidamente é efetuado o cálculo da densidade da corrente de curto-circuito térmica equivalente, recorrendo à expressão Eq.5.61.

$$\mathbf{S_{th}} = \frac{\mathbf{I_{th}}}{\mathbf{A_s}} = \mathbf{16{,}449\ A/mm^2} \qquad \text{Eq.5. 61}$$

Em seguida deverá ser calculada a densidade de corrente convencional de curta duração estipulada, com recurso à expressão Eq.5.55, tendo em consideração que o material é de cobre, e portanto os fatores para o cálculo para o valor de $\mathrm{S_{thr}}$ encontram-se na tabela 5.14.

Tabela 5.14- Fatores de cálculo para a S_{thr} para conductor de cobre

α_{20}	K_{20}	c	ρ
0,0039	56×10^6	390	8900

Deste modo tem-se o seguinte valor para a densidade de corrente convencional de curta duração estipulada:

$$\mathbf{S_{thr}} = \mathbf{83{,}884} \qquad \mathbf{A/mm^2} \qquad \text{Eq.5. 62}$$

Como procedido nos casos anteriores, é necessário que a condição em Eq.5.63 seja verdadeira, para que as barras resistam aos efeitos térmicos.

$$\mathbf{S_{th}} \leq \mathbf{S_{thr}} \times \sqrt{\frac{\mathbf{T_{kr}}}{\mathbf{T_k}}} \qquad \text{Eq.5. 63}$$

Como $\mathrm{S_{thr}} \times \sqrt{\mathrm{T_{kr}}/\mathrm{T_k}} = 48{,}431\ A/mm^2$ é maior que $16{,}449\ \mathrm{A/mm^2}$, pode-se concluir que o condutor em análise resistirá aos esforços térmicos de uma corrente de curto-circuito de 16 kA.

5.2- Exemplo de cálculo com recurso ao *software* Seedu

Com o objetivo de confrontar os resultados obtidos na secção 5.1, serão simulados os mesmos condutores, sujeitos às mesmas condições de curto-circuito, com as características descritas na secção 5.1.

5.2.1 - Cálculo dos esforços mecânicos e térmicos

Para o cálculo relativo aos esforços mecânicos serão apresentados os resultados finais dados pelo programa, onde se fará a respetiva comparação com os resultados obtidos na secção 5.1.

- Cabo entre a linha AT e o TI

Efetuando a simulação com o cabo descrito na secção 5.1, sujeito às mesmas condições de curto-circuito, obtiveram-se os resultados apresentados na figura seguinte, onde estes coincidem com os obtidos na secção 5.1. Verifica-se que o valor da força eletromagnética exercida sobre o condutor é 62,500 $\mathrm{N/m}$, tal como o obtido na secção 5.1. Em relação à força $\mathrm{F_{t,d}}$, obteve-se no cálculo automático um valor de 0,929 kN, o que corresponde ao valor encontrado no cálculo sem recurso ao Seedu, verificando-se o mesmo para $\mathrm{F_{f,d}}$ e para $\mathrm{a_{min}}$, onde estes apresentam no cálculo automático o mesmo valor obtido na secção 5.1.

No que concerne aos resultados térmicos, estes também estão em concordância, onde o Seedu chegou ao mesmo valor de densidade de corrente térmica (58,903 $\mathrm{A/mm^2}$), concluindo-se que o cabo não resiste aos esforços térmicos dos curto-circuitos. Contudo, como referido na secção 5.1, no cálculo dos esforços térmicos não é tido em consideração a distribuição da corrente no caso de existência de subcondutores.

Figura 5.3- Resultados do cálculo automático dos cabos

- Barramento AT

Analisando os resultados obtidos pelo Seedu, quando simulado o tubo descrito na secção 5.1 com a mesma configuração, sujeito às mesmas condições de curto-circuito, verifica-se que se obtêm os mesmos valores que os calculados sem recurso ao Seedu. De salientar que na *interface* de apresentação de resultados do Seedu, são apresentados os resultados mais importantes, aqueles em que se pode concluir se o condutor e suportes resistirão aos esforços dinâmicos dos curto-circuitos.

Figura 5.4- Resultados do cálculo automático dos tubos

Comparando os resultados obtidos pelo programa e os calculados manualmente, e verificando que estes coincidem, pode-se concluir que o programa está a efetuar os cálculos corretamente.

- Barramento MT

Observando os resultados apresentados pela aplicação desenvolvida, relativamente ao barramento de média tensão, verifica-se que estes estão de acordo com os obtidos pelo cálculo sem recurso ao Seedu, o que vem reforçar a eficácia do Seedu.

Figura 5.5- Resultados dos esforços dinâmicos nas barras

Salienta-se que o programa foi testado também para todos os casos exemplificados na norma CEI 865-2, no qual o programa respondeu com os mesmos resultados, tanto para os cálculos finais como para os intermédios.

5.3-Considerações Finais

Neste capítulo foram concebidos três exemplos de cálculo com e sem recurso ao Seedu, para uma barra de cobre, um tubo de alumínio e um cabo de alumínio de uma subestação tipo da EDP Distribuição e de uma subestação clássica da mesma empresa. Para verificar se estes condutores resistem aos efeitos térmicos e mecânicos das correntes de curto-circuito, foi necessário entrar com um conjunto de parâmetros. Estes parâmetros são relativos à corrente de curto-circuito, características do condutor, configuração dos condutores e características dos suportes.

A partir dos resultados obtidos com e sem recurso ao Seedu, foi feita uma análise comparativa. Desta análise comparativa, verificou-se que os resultados das forças que atuam sobre os suportes e condutores são iguais, onde consequentemente se chegou à mesma conclusão em relação à resistência dos equipamentos. Relativamente aos esforços térmicos, verificou-se que o valor da densidade da corrente de curto-circuito térmica equivalente foi igual para o exemplo com e sem recurso ao Seedu. Daqui se concluiu que o programa efetua eficazmente todos os cálculos relativos aos esforços térmicos e mecânicos resultante dos curto-circuitos.

Capítulo 6

Conclusões e perspetivas de desenvolvimentos futuros para o Seedu

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões, que têm como base o programa desenvolvido sobre a problemática do dimensionamento de subestações contra efeitos mecânicos e térmicos dos curto-circuitos. No final do capítulo são apresentados alguns aspetos que não foram contemplados para o desenvolvimento do Seedu e que podem ser de especial interesse para o desenvolvimento de um trabalho mais intenso sobre o tema estudado.

6.1- Principais Conclusões

O presente projeto surgiu como uma necessidade empresarial, no sentido de desenvolver um programa de cálculo para o dimensionamento automático de barramentos e suportes de uma subestação de distribuição contra os efeitos dinâmicos dos curto-circuitos. Pois o programa existente na empresa encontra-se desatualizado e neste momento não funcional. No entanto, analisando todas as vantagens inerentes a um *software* educativo para os profissionais na área de projeto e construção de subestações, tal como a escassez destes em ambientes empresariais, desenvolveu-se um programa didático direcionado para profissionais de engenharia eletrotécnica, que permita efetuar o dimensionamento de subestações.

O problema consistiu na verificação da resistência dos suportes e condutores aos efeitos térmicos e mecânicos, quando aplicada uma corrente de curto-circuito em subestações. Com o *software* desenvolvido é possível analisar o desempenho de vários equipamentos em diferentes pontos das subestações, de acordo com as características da corrente de curto-circuito, características da subestação, características de condutores e suportes. Dado que o Seedu é um *software* educativo do tipo simulação permite não só efetuar cálculos automáticos mas também, devido à vertente pedagógica, facilitar processo de aprendizagem sobre a temática a profissionais de engenharia eletrotécnica, e principalmente para aqueles que estão a iniciar atividade profissional na área de projeto de subestações.

Com o *software* desenvolvido foi comparado os resultados dos cálculos efetuados sem recorrer a uma ferramenta informática, com os resultados obtidos pelo Seedu, para um projeto-tipo da EDP Distribuição e para um barramento de uma subestação clássica. Desta comparação verificou-se que os resultados obtidos pelos dois métodos eram iguais. Também, com os exemplos de cálculo disponibilizados pela norma CEI 865-2, verificou-se que quando aplicados no Seedu, se obtiveram os mesmos resultados, tanto para os resultados finais, como para os cálculos intermédios. Por conseguinte, o programa foi validado para a realização de cálculo.

Em suma, o Seedu contribui para avaliar o desempenho de subestações elétricas quando percorridas por uma corrente de curto-circuito, tal como experimentar várias soluções para diversos pontos da subestação. Esta polivalência permite os profissionais em projeto de subestações elétricas encontrar as melhores soluções para os diferentes pontos de subestações.

6.2- Limitações do Seedu - Programa Educacional para o Desenho de Subestações

O *software* desenvolvido apresenta algumas limitações, nomeadamente, para o cálculo dos efeitos térmicos, não é considerada o efeito de distribuição de corrente no caso da existência de subcondutores. Portanto, uma possível otimização passaria, por incluir uma divisão da corrente pelos subcondutores de um barramento e assim calcular os efeitos térmicos que atuam sobre os subcondutores. Também, deveria ser integrado no cálculo dos efeitos térmicos o efeito pelicular para secções de condutores acima dos 600mm^2, que não foi considerado para o desenvolvimento do Seedu.

Poder-se-ia ainda expandir os cálculos de dimensionamento para disposição de barramentos não complanares, uma vez que o Seedu contempla somente configurações em que os condutores estão contidos no mesmo plano. Assim, analisar-se-ia os efeitos das correntes de curto-circuito para uma configuração em que os condutores estão em planos diferentes, o que consequentemente tornaria o programa mais multifacetado.

Relativamente à *interface* do Seedu, poderia ser melhorada, nomeadamente em ter mais animações visuais, sendo estas animações interativas, de forma captar mais os utilizadores para a utilização do programa. Poder-se-ia também colocar o programa num servidor *online,* utilizando-o através do *browser*. Assim, através de credenciais de acesso os utilizadores poderiam usar a aplicação sem ter que a instalar.

Referências

[1] M. D. Budinich, R. E. Trahan e M. D. Budinich, "Dynamic analysis of substation busbar structures," *Electric Power Systems Research,* pp. 47-53, 1997.

[2] F. M. Yusop, M. K. M. Jamil, D. Ishak, M. Husaini e S. Masri, "Investigation of Electromagnetic Force During Short-Circuit Test in Three-Phase Busbar System," em *IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering Research*, Penang, 2011.

[3] F. M. Yusop, M. K. M. Jamil, D. Ishak e S. Masri, "Study on the Electromagnetic Force Affected by Short-Circuit Current in Vertical and Horizontal Arrangement of Busbar System," em *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering*, Pahang, Malaysia, 2011.

[4] International Council on LargeElectric Systems, "The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Open Air Substations (PART II)," CIGRÉ, 2002.

[5] M. Abd-El-Aziz, M. N. F. Nashed, A. Adly e E. Abou-El-Zahab, "Electromagnetic Forces Densities for 3 Phase Busbar Parallel Connected to Rectifier Load," em *The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, 2011.

[6] D. Simpson, "The Use of Compression Technology on Busbars," em *79th EESA Conference*, Sydney Australia, 2003.

[7] CEI 60865-1, "Short-circuit currents – Calculation of effects – Part 1: Definitions and calculation methods," International Electrotechnical Commission, Geneva, 2011.

[8] CEI 865-1, "Short-circuit currents- Calculation of effects," CEI, Geneve, 1994.

[9] CEI 60909-0, "Short-circuit currents in three-phasea.c. systems –Part 0: Calculation of currents," International Electrotechnical Commission, Geneva, 2002.

[10] Schneider Electric, "Schneider Electric," Electrical, Schneider, 2010. [Online]. Available: http://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos tecnicos/tema2_efeitos.pdf. [Acedido em 15 maio 2014].

[11] S. C. S. Jucá, "A relevância dos softwares educativos na educação profissional," *Ciências e Cognição,* vol. 8, pp. 22-26, 2006.

[12] M. . R. d. Lima, "Construcionismo de Papert e Ensino-Aprendizagem de Programação de Computadores no Ensino Superior," Universidade Federal de São João Del-Rei, Minas Gerais, 2009.

[13] Papert Seymour, Logo: Computadores e Educação, São Paulo: Editora Brasiliense, 1985.

[14] K. L. Martins, "Teorias de Aprendizagem e Avaliação de Software Educativo," Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2002.

[15] A. J. Valente, "Diferentes usos do Computador na Educação," Núcleo de Informática

Aplicada à Educação, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2000.

[16] A. Hakan, E. Karakas, F. Aras e F. Ozudogru, “3D virtual classroom environment forteaching renewable energy production and substation equipment,” *International Journal of Electrical Engineering Education,* vol. 48, n.º Manchester University Press, pp. 294-303, 2010.

[17] P. Martínez-Lacañina, J. Martínez-Ramos, A. Bachiller-Soler e D. Monroy-Berjillos, “Teaching reliability analysis of HV/MV substations and distribution feeders using educational software,” *International Journal of Electrical Engineering Education,* vol. 49, n.º Manchester University Press, pp. 365-382, 2012.

[18] R. P. Gupta e S. C. Srivastava, “A distribution automation system simulatorfor training and research,” *International Journal of Electrical Engineering Education,* vol. 45, n.º Manchester University Press, pp. 336-355, 2010.

[19] J. Alves, L. Sampaio, S. Aldeia, A. C. Guelpeli e M. V. Guelpeli, “Metodologia para Avaliação de Software de Autoria como uma Ferramenta Computacional para auxílio no Desenvolvimento de Conteúdos Didático-Pedagógicos,” Departamento de Ciências Exatas e Tecnologia, São Paulo, 2000.

[20] R. X. T. Morais, “Software Educacional:A importância de sua avaliação e do seu uso em salas de aula,” Fortaleza, 2003.

[21] J. A. Valente, “Questão do Software: parâmetros para o desenvolvimento de Software Educativo,” Núcleo de Informática Aplicada à Educação, São Paulo, 1989.

[22] International Organization for Standardization, “Software product evaluation: Quality characteristics and guidelines for their use,” ISO/IEC, Geneva, 1991.

[23] P. A. T. Gonçalves e J. M. R. d. S. Tavares, “Uma Interface de Parametrização e Visualização para o programa FastComp,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2006.

[24] J. Preece, Y. Rogers e H. Sharp , Interaction Design: beyond human-computer interaction, New York: USA: John Wiley & Sons, 2002.

[25] P. Gonçalves, “Desenvolvimento de uma Interface Gráfica para o Programa FastComp,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005.

[26] J. Preece, Y. Roggers, D. Benyon, S. Holland e T. Carey, Human-Computer Interaction, Harlow: England: Addison-Wesley, 1994.

[27] M. R. Lima, “CONSTRUCIONISMO DE PAPERT E ENSINO-APRENDIZAGEM DE PROGRAMAÇÃO DE COMPUTADORES NO ENSINO SUPERIOR,” UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI, MINAS GERAIS – BRASIL, 2009.

[28] P. Coelho, Programação em Java 2, Lisboa: FCA-Editora de Informática, 2003.

[29] H. J. D. Faria, “Cálculo de Barramentos em subestações,” Faculdade de Engenhari ada Universidade do Porto, Porto, 2009.

[30] A. Sellen e A. Nicol, “The art for human computer-interface design,” Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1990.

[31] E. Ramos, “O fundamental na avaliação da qualidade do software educacional,” Laboratório de Software Educacional, São Paulo, 2010.

Anexo 1- Planta da Subestação Tipo da EDP Distribuição